

## ОПИС ЗАВЕРШЕНОЇ РОЗРОБКИ (бюджет)

**Розробка енергоефективних технічних рішень з модернізації обертових печей електродного виробництва із частковою заміною природного газу на сингаз**

**Development of energy-efficient technical solutions for modernization of rotating furnaces of electrode production with partial replacement of natural gas with syngas**

1. **Номер державної реєстрації - 0119U100163, номер реєстрації в університеті - 2217-п.**
2. **Науковий керівник - д.т.н., проф. Карвацький А.Я., Karvatskii Anton Ya.**
3. **Суть розробки, основні результати.**

**(укр.)**

Обґрунтовано спосіб газифікації з найвищим значенням величини теплотворної здатності синтетичного газу та прототип обладнання для прожарювання вуглевмісного сипучого матеріалу. Розроблено математичну модель процесу газифікації сипкого вуглецевого матеріалу в барабані-охолоджувачі обертової печі, що базується на континуально-дискретному формулюванні взаємодії суміші реагуючих газів з дискретною твердою фазою із врахуванням турбулентного режиму течії і теплового випромінювання. Сформульована математична модель включає тринадцять глобальних реакцій, з яких чотири – гетерогенні і дев'ять – гомогенні. Розроблено математичну модель процесу горіння синтез-газу разом з природним у робочому просторі обертової прожарювальної печі в континуальному формулюванні, що потрібна для визначення енергетичної ефективності застосування процесу газифікації. З використанням розроблених математичних моделей отримано закономірності процесів газифікації в барабані-охолоджувачі та горіння синтез-газу разом з природним у робочому просторі обертової печі. Розроблено технічні рішення з термооброблення вуглецевмісного наповнювача електродної промисловості в обертових печах з частковим заміщенням природного газу синтез-газом та рекомендації щодо модифікації конструкцій термічного обладнання і технологічних регламентів його експлуатації. Розроблені технічні рішення включають ескізні проекти газифікатора-охолоджувача обертової печі, який представляє собою модернізоване діюче обладнання барабана-охолоджувача, та водоохолоджуваного пальникового пристрою для спалювання синтез-газу разом з природним без попереднього змішування в обертовій прожарювальній печі. На промисловій обертовій печі для прожарювання сипучих вуглевмісних матеріалів (антрациту, нафтового або сланцевого коксу) отримано дані експериментальних досліджень, що підтверджують ефективність розроблених технічних рішень.

**(англ.)**

The gasification method with the highest value of the syngas calorific value and the prototype of equipment for calcining carbon-containing bulk material are substantiated. A mathematical model of the process of gasification of bulk carbon-containing material in a drum-cooler of a rotary kiln was developed, based on a continuous-discrete formulation of the interaction of a mixture of reacting gases with a discrete solid phase, taking into account the turbulent flow regime and thermal radiation. The formulated mathematical model includes thirteen global reactions, of which four are heterogeneous and nine are homogeneous. A mathematical model has been developed for the combustion of synthesis gas together with natural gas in the working space of a rotary calcining furnace in a continuous formulation, which is necessary to determine the energy efficiency of the gasification process. Using the developed mathematical models, the regularities of the processes of gasification in a drum-cooler and combustion of synthesis gas together with natural gas in the working space of a rotary kiln were obtained. Technical solutions have been developed for the heat treatment of the carbon-containing filler of the electrode industry in rotary kilns with partial replacement of natural gas with synthesis gas and

recommendations for modifying the designs of thermal equipment and technological regulations for its operation. The developed technical solutions include draft designs of a rotary kiln gasifier-cooler, which is a modernized operating equipment for a calcined material cooler drum, and a water-cooled burner for burning synthesis gas together with natural gas without preliminary mixing in a rotary kiln. On an industrial rotary kiln for calcining bulk carbon-containing materials (anthracite, petroleum or shale coke), experimental data were obtained, confirming the effectiveness of the developed technical solutions.

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

- Пат. 139897 U Україна, МПК (2006.01) C10L 9/08. Спосіб одержання прожареного нафтового коксу / Є.М. Панов, А.Я. Карвацький, І.О. Мікульонок, С.В. Лелека, О.В. Бондаренко, А.В. Вагін, О.В. Тютюнник ; заявник і патентовласник – ПрАТ «Укрграфіт». № u201907630; заявл. 08.07.2019; опубл. 27.01.2020, Бюл. № 2/2020.
- Пат. 142467 U Україна, МПК (2006.01) F27B 7/36 F27B 7/22 C10B 49/04. Пристрій для подавання атмосферного повітря в барабан обертової печі / А. Я. Карвацький, С.В. Лелека, І.О. Мікульонок та ін. ; заявник і патентовласник – ПрАТ «Укрграфіт». № u201911206; заявл. 18.11.2019; опубл. 10.06.2020, Бюл. № 11/2020.
- Пат. 137451 U Україна, МПК(2006) G01N 25/00, G01N 15/00. Спосіб визначення ефективних значень теплофізичних властивостей сипкого матеріалу / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонок, Г. М. Васильченко, С. В. Лелека, В. М. Витвицький, К. М. Короленко ; заявник і патентовласник – КПІ ім. Ігоря Сікорського. № u201902840 ; заявл. 22.03.2019. опубл. 25.10.2019, Бюл. № 20/2019.
- Пат. 146611 U Україна, МПК (2021.01) B21C 29/00. Пристрій для 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 06961; заявл. 30.10.2020; опубл. 03.03.2021, Бюл. № 9/2021.
- Пат. 146271 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, О. Д. Шелюк, В. Ю. Щербина; заявник і патентовласник – вони же. № u 2020 06363; заявл. 01.10.2020; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5/2021.
- Пат. 136863 U Україна, МПК(2006.01) B01F 7/16. Змішувач сипкого матеріалу / І. О. Мікульонок, А. Я. Карвацький ; заявник і патентовласник – КПІ ім. Ігоря Сікорського. № u201902842 ; заявл. 22.03.2019. опубл. 10.09.2019, Бюл. № 17/2019.
- Пат. 146273 U Україна, МПК B02C 15/08 (2006.01). Ролико-маятниковий млин / П. О. Бондаренко, А. Я. Карвацький, С.В. Лелека, І.О. Мікульонок, Є. М. Панов, В. Ю. Щербина ; заявник і патентовласник – вони же. № u 2020 06365; заявл. 01.10.2020; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5/2021.

#### **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 (7 патентів) та опубліковані в журналах, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus (8 статей). Перевагою отриманих науково-прикладних результатів НДР над світовими аналогами полягають в застосуванні модернізації наявного промислового обладнання з метою одержання та спалювання синтетичного газу замість використання коштовного спеціалізованого обладнання для газифікації твердих вуглецевмісних матеріалів.

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

Застосування розробок НДР можливе за двома варіантами технічних рішень:

- перше – безпосередня генерація синтез-газу та його спалювання в обертовій прожарювальній печі за рахунок подачі в її робочий простір водяної пари в кількості 400 кг/год, що дає можливість заощадити до 40 % витрати природного газу на підтримку потрібного температурного рівня процесу прожарювання вуглецевмісної сировини в печі;
- друге – генерація в барабані-охолоджувачі обертової печі синтетичного газу продуктивністю 1500 нм<sup>3</sup>/год та теплотворною здатністю 7,2 МДж/нм<sup>3</sup>. Спалювання синтез-газу в робочому просторі обертової печі з частковою або повною заміною природного газу в кількості 96 нм<sup>3</sup>/год і 193 нм<sup>3</sup>/год, відповідно. При цьому витрати синтетичного газу будуть становити 454 нм<sup>3</sup>/год і 908 нм<sup>3</sup>/год, відповідно, що значно менше за продуктивність за синтетичним газом барабана-охолоджувача обертової печі;
- вартість реалізації проекту складає близько 50 тис. грн. і 2 млн грн., відповідно, за першим і другим варіантами технічних рішень;
- терміни впровадження та окупності складають 1–6 міс і 1 рік, відповідно;
- економічний ефект від впровадження розробок у промисловість становить (0.142 –0.354) тис. грн на тону продукції.

### **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 тепло-гідродинамічного стану обладнання під час високотемпературного оброблення сипких вуглецевмісних наповнювачів в обертових печах з частковим заміщенням природного газу на синтез-газ з метою визначення раціональних конструкцій та регламентів експлуатації обладнання готова до впровадження.

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

Основні теоретичні положення роботи, що пов'язані з розробкою наукових засад прогнозування фізичних властивостей сипких матеріалів різної рецептури на основі вуглецевих сипких матеріалів для печей графітування електродного виробництва та визначення їх придатності для забезпечення температурних умов технологічного процесу та енергетичної ефективності обладнання, викладені у монографіях: «Вогнетривкі футерівки і теплоізоляція печей електродного виробництва» і «Advanced Thermoelectric Materials. Thermoelectric Properties of Granular Carbon Materials». За матеріалами роботи захищено дисертацію доктора філософії асп. Витвицьким В.М. на тему «Обладнання та процес живлення черв'ячного екструдера полімерною сировиною» за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». Підготовлено електронні версії навчальних посібників з грифом Вченої ради КПІ імені Ігоря Сікорського на теми: «Моделювання статистики і динаміки сипких матеріалів у LIGGGHTS» і «Нелінійні задачі механіки суцільних середовищ. Комп'ютерний практикум з навчальної дисципліни». Результати роботи впроваджено у виробництво на ПрАТ «Укрграфіт», м. Запоріжжя. Предметом впровадження є: технічні рішення з термооброблення вуглецевмісного наповнювача електродної промисловості в обертових печах з частковим заміщенням природного газу на синтез-газ, рекомендації щодо модифікації конструкцій термічного обладнання та технологічних регламентів устаткування; математична модель процесу газифікації сипкого вуглецевого матеріалу в барабані-охолоджувачі обертової печі, що базується на континуально-дискретному формулюванні взаємодії суміші реагуючих газів з дискретною твердою фазою із врахуванням турбулентного режиму течії і теплового випромінювання; математична модель процесу горіння синтез-газу разом з природним у робочому просторі

обертової прожарювальній печі в континуальному формулюванні; закономірності процесів газифікації в барабані-охолоджувачі та горіння синтез-газу разом з природним у робочому просторі печі; дані експериментальних досліджень на промисловій обертовій печі для прожарювання сипучих вуглевмісних матеріалів (антрациту, нафтового або сланцевого коксу).

### 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

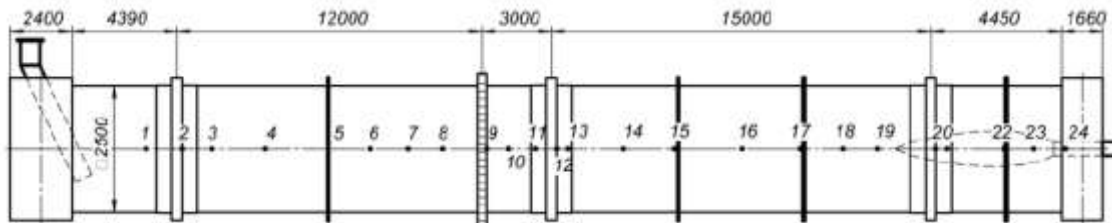
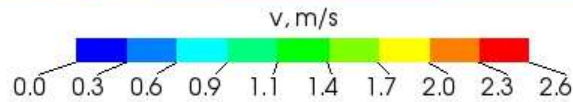


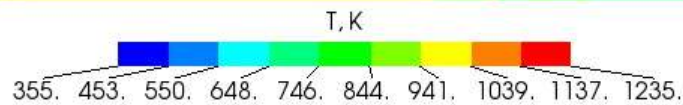
Схема вимірювання температури зовнішньої поверхні кожуха печі



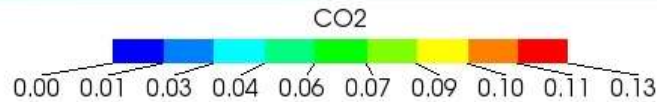
Термометричні кільця контролю температури марок LTH (а) і STH (б) та конструкція графітового стакану (в) для їх розміщення



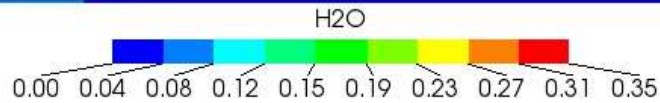
а



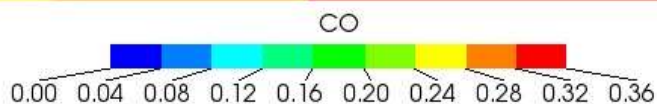
б



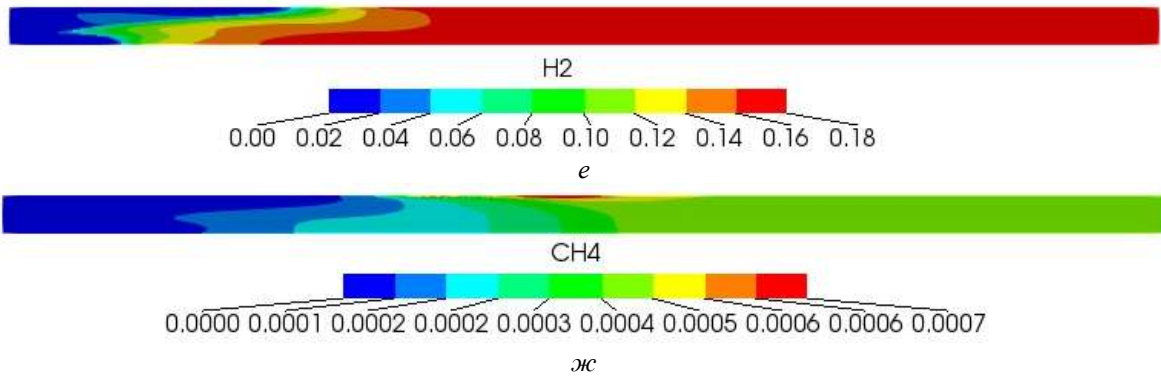
в



г

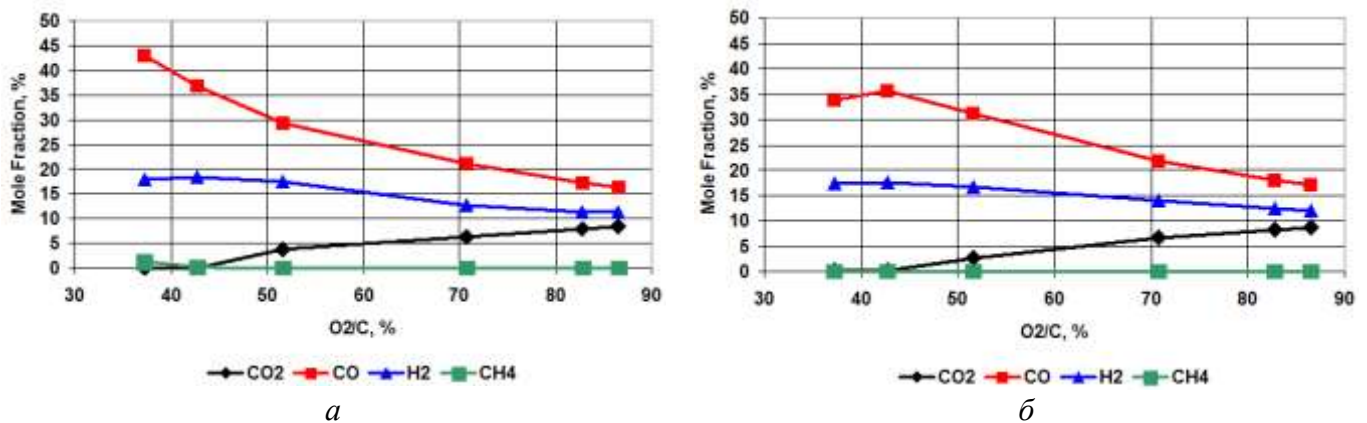


д



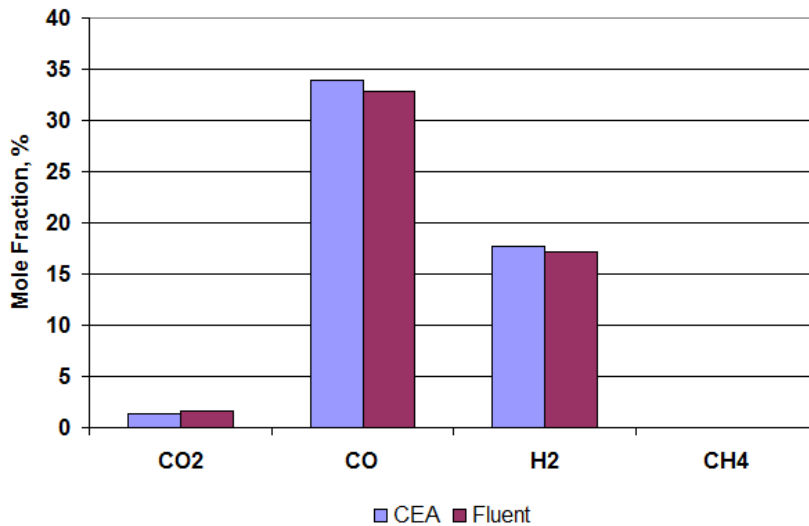
$a$  – швидкість;  $b$  – температура;  $v$  – молярна частка  $\text{CO}_2$ ;  $z$  – молярна частка  $\text{H}_2\text{O}$ ;  
 $d$  – молярна частка  $\text{CO}$ ;  $e$  – молярна частка  $\text{H}_2$ ;  $ж$  – молярна частка  $\text{CH}_4$

Фізичні поля під час процесу газифікації пилової фракції вуглецевмісного наповнювача за граничних умов III роду, довжини ізотермічної зони барабана 11,5 м і співвідношення  $\text{O}_2/\text{C} = 48,5\%$



$a$  – Fluent;  $b$  – CEA

Залежність молярних часток компонентів синтез-газу на виході з барабана-охолоджувача обертової печі від співвідношення  $\text{O}_2/\text{C}$  за граничних умов I роду і довжини ізотермічної зони 11,5 м



Порівняння кількісного складу синтез-газу на виході з барабана-охолоджувача обертової печі за граничних умов III роду і довжини гарячої зони 11,5 м за співвідношення  $\text{O}_2/\text{C} = 48,5\%$ , отриманого з використанням програмних продуктів Fluent і CEA



1 – подача метану; 2 – подача синтез-газу; 3 – подача охолодної води;  
4 – вихід охолодної води

Комбінований водоохолоджуваний пальниковий пристрій для спільного спалювання синтез газу разом з природним без попереднього змішування

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

1. Вогнетривкі футерівки і теплоізоляція печей електродного виробництва : монографія / Є. М. Панов, Г. М. Васильченко, С. В. Лелека, А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонюк. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 148 с. (8,6 д.а.) <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37600>
2. Thermoelectric Properties of Granular Carbon Materials / A. Ya. Karvatskii, G. M. Vasilchenko, E. M. Panov, S. V. Leleka, T. V. Lazariiev, A. Yu. Pedchenko, T. V. Chirka // *Advanced Thermoelectric Materials* / Chong Rae Park (ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., Beverly, MA 01915-6106 : Scrivener Publishing LLC, 2019. P. 437–468. <https://doi.org/10.1002/9781119407348.ch10>
3. Моделювання статичної і динамічної 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. Мікульонюк, В. М. Витвицький ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 76 с.
4. Карвацький А. Я. Механіка суцільних середовищ. Теоретичні основи навчальної дисципліни: навч. посіб. для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування», «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництв полімерних і будівельних матеріалів і виробів». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 290 с. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27528>
5. Determination of parameters of the carbon-containing materials gasification process in the rotary kiln cooler drum / A. Karvatskii, T. Lazariiev, S. Leleka, I. Mikulionok, O. Ivanenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 106. No 4/8. P. 65–76. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210767 <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/210767/210939>
6. Determining efficient values for the thermophysical properties of bulk materials / A. Karvatskii, Ye. Panov, G. Vasylichenko, V. Vytvytskyi, K. Korolenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2. No 5(98). P. 55–62. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.164791
7. Assessment of the Effect of Oxygen and Carbon Dioxide Concentrations on Gas Evolution During Heat Treatment of Thermoanthracite Carbon Material / O. Ivanenko, Ye. Panov, N. Gomelia, A. Vahin, S. Leleka // *Journal of Ecological Engineering*. 2020; 21(2): 139–149. doi: 10.12911/22998993/116326 <http://www.jeeng.net/Issue-2-2020,7955>
8. Development of a Catalyst for Flue Gas Purification from Carbon Monoxide of Multi-Chamber Furnaces for Baking Electrode Blanks / O. Ivanenko, A. Trypolskyi, N. Gomelya, A. Karvatskii, A. Vahin, O. Didenko, V. Konovalova, P. Strizhak // *Journal of Ecological Engineering*. Vol. 22, Issue 1, January 2021, pages 174–187. <https://doi.org/10.12911/22998993/128857>
9. Use of Metal Oxide-Modified Aerated Concrete for Cleaning Flue Gases from Carbon Monoxide / O. Ivanenko, N. Gomelya, T. Shablii, 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>
10. Mikulionok I.O. Classification of means of enhancement of heat transfer from the outer surface of pipes // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2019. Vol. 55, Nos 5–6 (September). P. 491–499. DOI 10.1007/s10556-019-00651-4 <https://link.springer.com/article/10.1007/s10556-019-00651-4>



11. Сучасний стан проблеми отримання і використання синтез-газу на основі реакції газифікації вуглецю. Частина 1. Аналіз процесу газифікації та його практичне застосування / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, І. О. Мікульонок // Вісник НТУУ "КПІ". Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2020. № 1(19). С. 5–16. DOI: 10.20535/2617-9741.1.2020.207801 <http://chemengine.kpi.ua/article/view/207801/207970>
12. Сучасний стан проблеми отримання і використання синтез-газу на основі реакції газифікації вуглецю. Частина 2. Математичні моделі фізичних полів процесу газифікації вуглецевмісних матеріалів / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, І. О. Мікульонок // Вісник НТУУ "КПІ". Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2020. № 2(19). С. 5–20. DOI: 10.20535/2617-9741.2.2020.208051 <http://chemengine.kpi.ua/article/view/208051>
13. Leleka, S., Karvatskii, A., Mikulionok, I., Vytvytskyi, V., Glukhov, O., Bondarenko, O., & Pavelko, O. (2020). Improving the energy efficiency of a rotary kiln for calcining carbon-containing raw materials. *Energy Technologies & Resource Saving*, (2), 63-72. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2020.08>
14. Mathematical Modeling of Physical and Mechanical Properties of Polymeric Materials Reinforced with Carbon Nanotubes / A. Karvatskii, T. Lazarev, I. Mikulionok, V. Vytvytskyi, V. Solovei // *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021, June 8–11, 2021, Lviv, Ukraine. – Vol. 2: Mechanical and Chemical Engineering. Cham, Switzerland: Springer. 2021. P. 33–42.* [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_4)

**13. Ключові слова.** Обертова піч, барабан-охолоджувач, вуглецевмісний матеріал, термооброблення, газифікація, синтез-газ, числове моделювання, енергоефективність