

17. Neshmashnyi E. Calculating and rationalising the relativity norms for determining the slopes of quarry flanks. Soviet mining journal. -1987. -vol. 1, num. 3, -Oxonian Press, India. -p. 32-38.

18. Neshmashnij E.A., Tkachenko G.I. Stability evaluation of jsc "YUGOK" eastern pit wall taking into account seismic mass blasting effect. Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. - Кривий Ріг: ДВНЗ «КНУ», - 2017. - № 44. - С.27-32.

19. Fanti D., Luzi G., Tarchi D., Landslides monitoring by using ground-based SAR interferometer //Eng.Geology.– 2003.-Vol.68,№1-2.-P.15- 30.

Рукопись поступила в редакцию 09.04.2018

УДК 66-03

О. А. ЖУЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., А. П. КОРОТИНСЬКИЙ, аспірант  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗРІДЖЕННЯ НА ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ НА ЕТАПІ КАМЕРА «ПІД ВОГНЕМ»

**Мета.** Відомо, що якість кінцевої продукції випалювання вуглецевих виробів залежить від багатьох факторів, найважливішим з них є температурний режим. Дослідження зв'язку температурного поля печі в залежності від технологічних параметрів, та їх раціональне використання дозволяє досягти меншого виходу бракованої продукції. Тому є важливим моделювання цих процесів з врахуванням максимальної кількості факторів впливу, яке дозволить мінімізувати час та вартість виробництва готової продукції. Саме тому, дослідження температурних полів, а відповідно особливостей температурних режимів заготовок при впливі розрідження на температурний режим роботи камери печі випалювання вуглецевих виробів на етапі «під вогнем», що дозволить мінімізувати перепад температур по заготовкам та є важливим етапом розробки системи керування даним процесом, яка повинна забезпечувати вихід готової продукції відповідної якості.

**Методи.** У якості методу дослідження застосовувався метод математичного моделювання на базі моделі, що побудована на основі осереднених за Рейнольдсом рівняннях Нав'є-Стокса (RANS). На основі чисельного моделювання проведено дослідження впливу розрідження на температурний режим роботи камери печі випалювання вуглецевих виробів на етапі «під вогнем». Дослідження впливу розрідження проводиться шляхом порівняння температурних режимів камери печі при різних режимах роботи печі, а саме при розрідженні 50 Па та 100 Па.

**Наукова новизна.** Виявлено закономірності зміни середнього значення перепаду температур по заготовкам при різних режимах роботи печі. Основну увагу дослідження було приділено питанням однорідності температурного поля заготовок, що суттєво впливає на їх якість.

**Практична значимість.** Отримані результати зміни максимальних та мінімальних температур по кожній із заготовок можуть бути використані при розробці вдосконаленого регламенту ведення кампанії випалювання. Проведене дослідження спрямоване на підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів.

**Результати.** Результати проведеного чисельного моделювання засвідчили суттєвий вплив розрідження на температурний режим процесу випалювання на етапі «під вогнем». Збільшення розрідження призводить до зменшення абсолютних значень температур по всьому об'єму печі та одночасно призводить до зменшення величин перепадів температур у заготовках, які випалюються.

**Ключові слова:** випалювання, вуглецеві вироби, моделювання, розрідження, температурні поля, камера «під вогнем».

doi: 10.31721/2306-5451-2018-1-47-44-49

Випалювання у вуглехімії – процес, в якому вуглисті зв'язуючі матеріали, зазвичай кам'яновугільний смоляний пек або нафтовий пек, як частина сформованої вугільної суміші, перетворюється у вуглець, даючи при повільному нагріванні тверде вуглецеве тіло [1]. На сьогоднішній день вуглецеві вироби, такі як графітовані електроди, ніпелі, вуглецеві блоки, знаходять широке застосування у різних галузях промисловості - металургійній, хімічній, металообробній, машинобудівній, нафтохімічній та інших. Одним з основних технологічних процесів у виробництві вуглецевих виробів є процес їх випалювання, що проводиться у печах камерного типу.

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** З технології виробництва вуглеграфітових виробів відомо, що кількість повітря, яке подається на горіння палива, визначається в основному, розрідженням у печі, а також, що розрідження повинно бути таким, щоб газу, які протягуються через піч, могли досягти потрібної швидкості для подолання сили

тертя при проходженні через ряд камер та всі борова. Крім того, газу, що відходять, віддаючи тепло у камерах, покидають піч з порівняно низькою температурою, через що природна тяга може виявитись недостатньою. Для нормальної роботи печі потрібне штучне розрідження. Розрідження безпосередньо за піччю повинно бути не менше  $60 \cdot 9,80665 \text{ Па}$  [2].

Оскільки якість кінцевої продукції процесу випалювання, залежить від температурного режиму ведення процесу, то дослідження впливу розрідження як керувального технологічного параметру на температурні поля, що формуються під час кампанії, є важливою науково-технічною задачею.

Як відомо [3], процес випалювання вуглецевих виробів проходить у три стадії: нагрівання, «під вогнем» та охолодження. Метою даного дослідження є визначення впливу розрідження на температурні поля печі випалювання на етапі камера «під вогнем».

**Аналіз досліджень і публікацій.** Результати досліджень теплофізичних процесів, що відбуваються під час випалювання вуглецевих виробів, наведено у роботах [4–9]. В них проведено дослідження впливу на процес випалювання таких факторів як: коефіцієнта поглинання димових газів, ступеня чорноти газових каналів, співвідношення між радіаційним і конвективним теплообміном, комбінованої пересипки, схеми завантаження камери печі, геометрії внутрішньої поверхні склепіння, виду наповнювача та його гранулометричного складу, швидкості нагріву, кінцевої температури випалювання, конструкції камери печі на процес випалювання електродної продукції у багатокамерних печах випалювання.

У наведених вище роботах не розглядається етап камера «під вогнем» як окрема складова кампанії випалювання та, відповідно, не розглядаються впливи керувальних технологічних параметрів на температурний режим процесу.

**Постановка задачі.** Задачею статті є дослідження впливу розрідження на загальний розподіл температур процесу випалювання вуглецевих виробів на етапі камера «під вогнем», а також на динаміку температур та перепадів температур безпосередньо виробів, що випалюються.

**Викладення матеріалу та результати.** Проведення вказаного вище дослідження потребує об'ємного промислового експерименту, що практично неможливо в основному з двох причин. По-перше, він призводить до значних додаткових фінансових затрат і, по-друге, не гарантує безпекові умови виробництва.

У зв'язку з цим, єдиною альтернативою виступає застосування методу математичного моделювання, що і використовується у даному дослідженні на основі моделі [10]. Дана математична модель побудована на основі осереднених за Рейнольдсем рівняннях Нав'є-Стокса (RANS) в наближенні  $k - \epsilon$  моделі з урахуванням стискання рідини [11] та включає у себе наступні рівняння:

- нерозривності;
- збереження кількості руху;
- транспортування хімічних компонентів реакції горіння;
- енергії в ентальпійному вигляді;
- турбулентної кінетичної енергії та швидкості її дисипації [12].

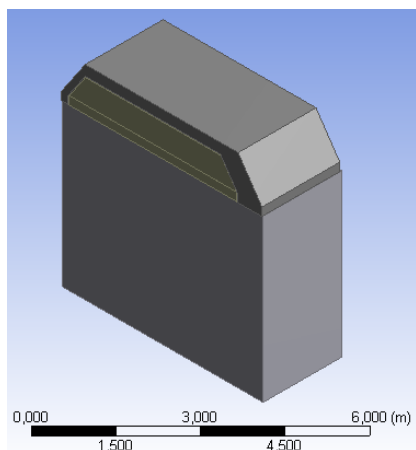


Рис. 1. Геометрія касети печі випалювання

У даному дослідженні розглядається одна із камер багатокамерної кільцевої закритої печі випалювання типу Рідгаммер [13,14], в яку завантажено 5 заготовок діаметрами 700 мм та висотою 2100 мм. Прийнято, що початкова температура всіх складових касети печі складає 1273 К. Температура повітря – 300 К.

Досліджувана касета печі випалювання з розміром  $3,8 \times 0,76 \times 4,05$  м має геометрію, що наведена на рис. 1.

Прийнято, що тривалість процесу випалювання 480 год., число камер на охолодженні – 1, число камер під вогнем – 1, число камер на підігріві димовими газами – 4. Темп випалювання складає 96 год. Нумерація заготовки зліва направо (починається від вогневого колодязя).

Для подальшого чисельного моделювання прийнято наведені у табл. 1-4 фізичні властивості матеріалів печі випалювання та її завантаження відповідно до [9,15-16].

Таблиця 1

Теплофізичні властивості вогнетривкого шамоту

$T, K$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$
273	1900	675	0,84
323	1900	797	-
373	1900	877	-
423	1900	933	-
473	1900	975	-
523	1900	1008	0,99
773	1900	1111	1,14
1023	1900	1176	1,29
1273	1900	1230	1,44
1523	1900	1279	1,59

Таблиця 2

Теплофізичні властивості матеріалу заготовок

$T, K$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$
273	1635	690	8
400	1635	893	-
500	1635	1160	8,3
600	1635	1315	-
700	1635	1423	-
800	1635	1501	8,5
900	1635	1566	-
1000	1635	1620	8,8
1100	1635	1669	-
1200	1635	1710	9,3
1400	1635	1790	-

Таблиця 3

Теплофізичні властивості теплоізоляційної шихти

$T, K$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$
273	800	690	0,35
400	800	893	-
500	800	1160	-
600	800	1315	-
700	800	1423	-
800	800	1501	0,73
900	800	1566	-
1000	800	1620	-
1100	800	1669	-
1200	800	1710	1,25
1400	800	1790	-

Таблиця 4

Теплофізичні властивості повітря

$T, K$	$C_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$
273	1005	0,0244
373	1009	0,0321
473	1026	0,0393
573	1047	0,046
673	1068	0,0521
773	1093	0,0574
873	1114	0,0622
973	1135	0,0671
1073	1156	0,0718
1173	1172	0,0763
1273	1185	0,0807
1373	1197	0,085
1473	1210	0,0915

Дослідження проводилось для двох значень розрідження – 50 Па та 100 Па. Результати моделювання температурних полів камери, пересипки та заготовок представлені на рис. 2-4.

Наприкінці випалювання у режимі «камера під вогнем» спостерігаються явно виражені холодна та гаряча області печі (рис. 2). Найвищою є температура стінок вогневого колодязя 1651 К при розрідженні 50 Па та 1517 К при розрідженні 100 Па, мінімальною є температура протилежної стінки 747,84 К та 663,69 К відповідно. Перепад температури по всьому об'ємі камери печі сягає 903,16 К та 853,31 К відповідно.

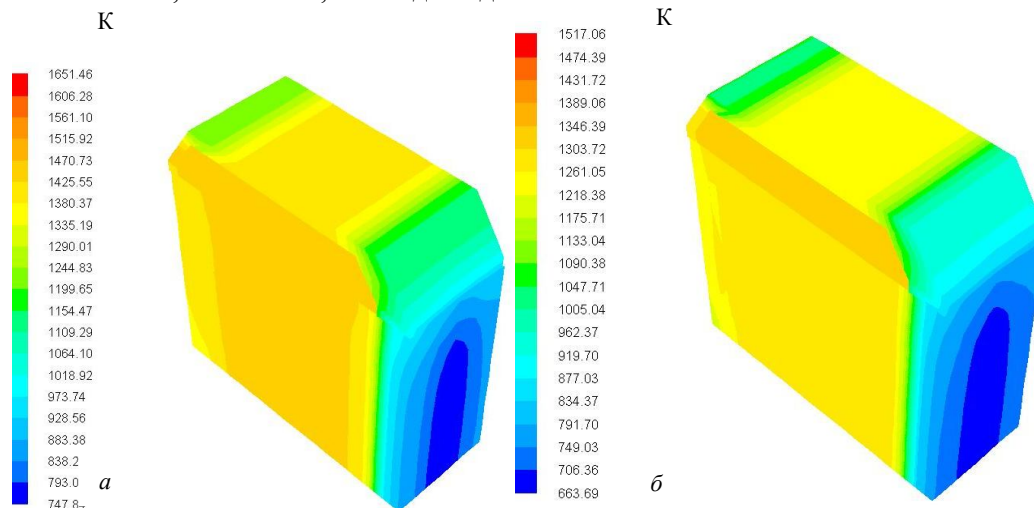


Рис. 2. Температурні поля камери печі при розрідженні 50 Па (а) та 100 Па (б)

Максимальна та мінімальна температури по всьому об'ємові пересипки становлять 1429 К та 950 К при розрідженні 50 Па і 1295 К та 807 К при розрідженні 100 Па. Максимальний перепад температур по пересипці складає 479 К та 488 К відповідно. У температурному полі пересипки прослідковується наявність значної холодної та підсклепінчатої області (рис. 3).

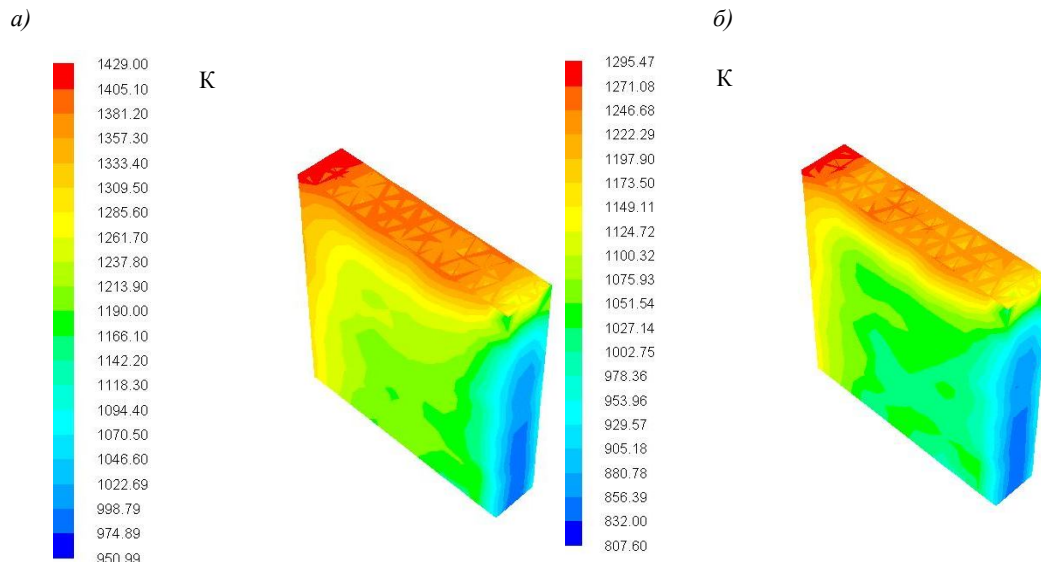


Рис. 3. Температурне поле пересипки при розрідженні 50 Па (а) та 100 Па (б)

Температура заготовок (рис. 4) зменшується зверху до низу печі, що пояснюється зменшенням температури димових газів, при проходженні газового тракту камери печі. Має місце перепад температур від більш теплого боку печі до більш холодного. Температура заготовок приймає значення 982-1310 К при розрідженні 50 Па, та 830-1155 К при розрідженні 100 Па, максимальний перепад температур по заготовкам становить 328 К та 325 К відповідно.

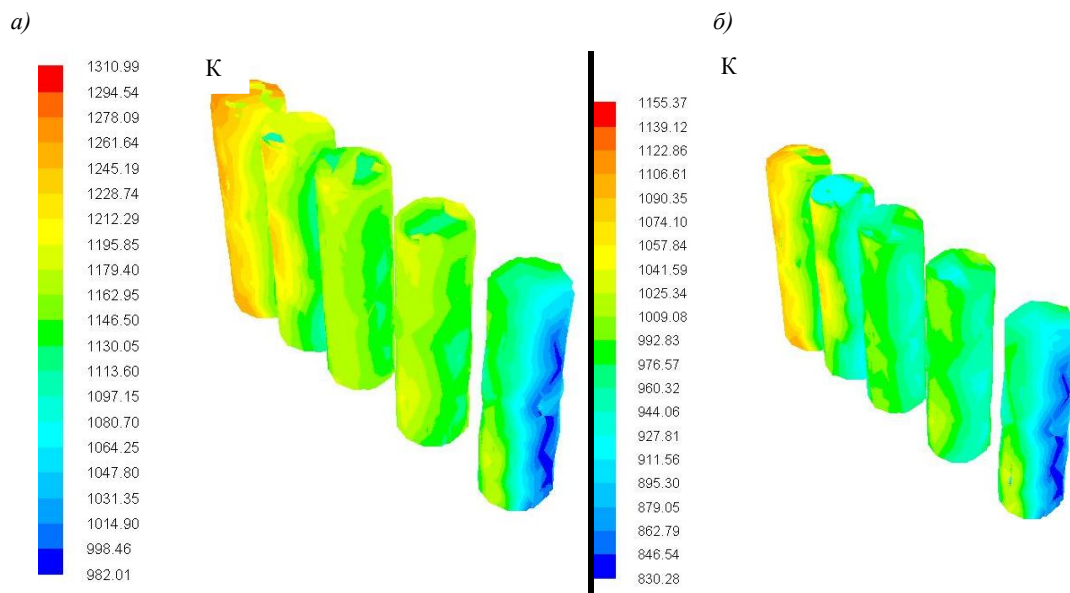


Рис. 4. Температурні поля заготовок при розрідженні 50 Па (а) та 100 Па (б)

Графіки зміни мінімальної та максимальної температур у заготовках протягом всієї кампанії випалювання представлені на рис. 5-6. Найбільш інтенсивне нагрівання відбувається заготовки 1, а найбільш повільне - заготовки 5. При збільшеному розрідженні графіки зміни температур по заготовкам проходять ближче один до одного, ніж при розрідженні 50 Па, що говорить про більш однорідне їх нагрівання, тобто про позитивний вплив збільшеного розрідження.

При збільшенні розрідження температури по всьому об'ємові печі зменшуються.

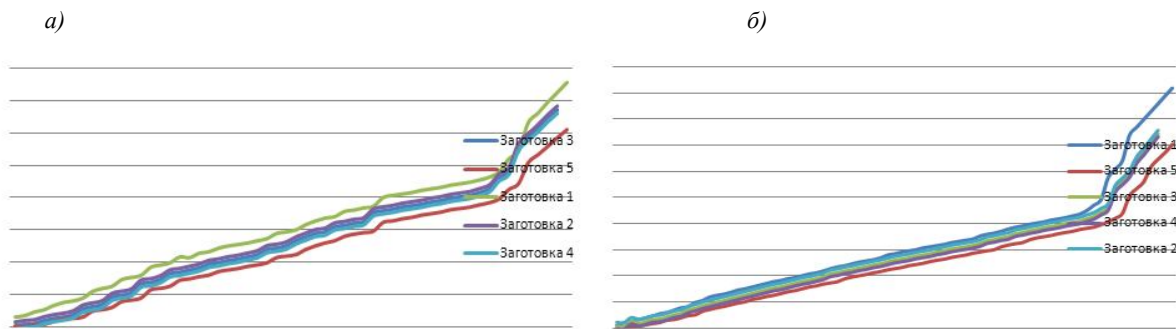


Рис. 5. Графік зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температури по заготовкам при розрідженні 50 Па

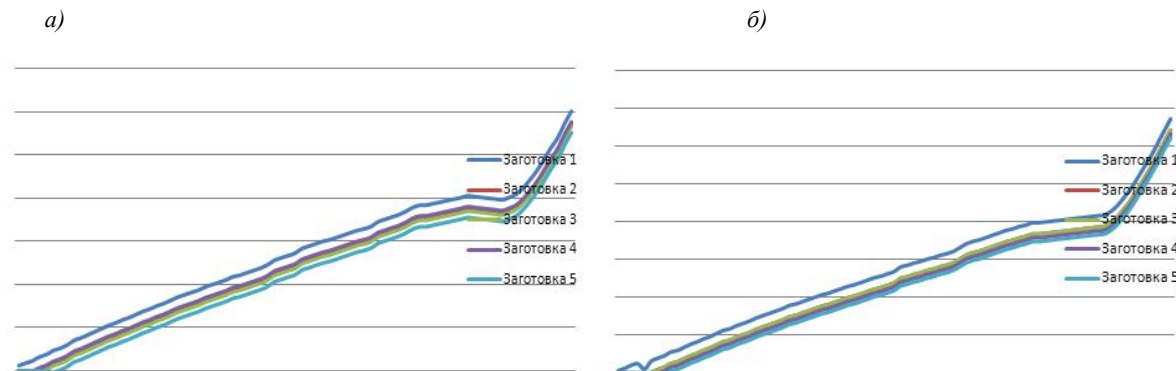


Рис. 6. Графік зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температури по заготовкам при розрідженні 100 Па

На рис.7 наведено гістограми перепаду температур по кожній з заготовок. З представлених результатів видно, що збільшення розрідження призводить до зменшення перепаду температур.

Т, К

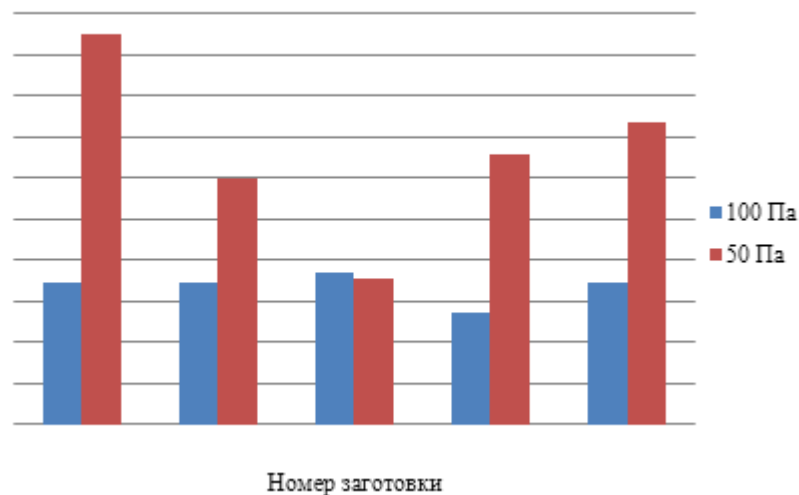


Рис. 7. Гістограми перепаду температур по заготовкам при розрідженні 50 та 100 Па

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Проведено дослідження впливу розрідження на температурний режим камери «під вогнем» у процесі випалювання вуглецевих виробів у цілому. Особливу увагу приділено динаміці температур та перепадів температур виробів, що випалюються.

Показано, що зміна розрідження суттєво впливає на температурні поля процесу випалювання. Збільшення розрідження призводить до зменшення абсолютних значень температур по всьому об'єму печі та одночасно призводить до зменшення величин перепадів температур у заготовках, які випалюються.

Подальші дослідження мають стосуватися етапів нагрівання та охолодження процесу випалювання вуглецевих виробів.

## Список літератури

1. Глосарій термінів з хімії // **Й. Опейда, О. Швайка**. Ін-т фізико-органічної хімії та вуглекімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет. – Донецьк: Вебер, 2008. – 758 с. – ISBN 978-966-335-206-0.
2. **Чалых Е.Ф., Пашенкова Л.Ф.** Печи электродных заводов Учебное пособие. - Москва: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1983. - 76 с.
3. **Panov Ye. N., Kutuzov S. V., Karvatsky A. Ya., Shilovich I. L., Vasilchenko G. N., Shilovich T. B., Leleka S. V., Danilenko S. V., Pulinets I. V., Chirka T. V., Lazarev T. V.** Power saving at production of electrode products. XVII Intern. Conf. «Aluminium of Siberia», V Conference «Metallurgy of Non-Ferrous and Rare Metals», VII Symposium «Gold of Siberia», (Krasnoyarsk, Russia, Sept. 7–9, 2011) : Proceedings of the Intern. Congress, Krasnoyarsk : «Verso», 2011. — P. 412–423.
4. Совершенствование регламентов обжига с учетом динамики газовой выделенной обжигаемых заготовок / **А.Я. Карвацкий, С.В. Лелека, И.В. Пулинец и др.** // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 6/5 (54). – С. 42–45.
5. Power saving at production of electrode products / **Ye.N. Panov, S.V. Kutuzov, A.Ya. Karvatsky** and others // XVII Intern. Conf. «Aluminium of Siberia», V Conference «Metallurgy of Non-Ferrous and Rare Metals», VII Symposium «Gold of Siberia». – 7–9 Sept., 2011. – Krasnoyarsk, Russia : Proceedings of the Intern. Congress ; Krasnoyarsk : «Verso», 2011. – Pp. 412–423.
6. **Шилович И.Л.** Расчетно-экспериментальное исследование процесса обжига углеграфитовых изделий в многокамерных печах / И.Л. Шилович, И.В. Пулинец // 36. Тез доп. XIII Міжн. науково-практ. конф. студ., асп. та мол. вчених «Екологія. Людина. Суспільство». – 19–23 травня 2010. – Київ : НТУУ «КПІ». – С. 244–245.
7. Study on Anode Baking Parameters in Open-Top and Closed-Type Ring Furnaces / **B.Borzu, A.Mohesn, M.Siahoui, V.Nabi, S.Saeb** // Light Metals. – 2013. – Pp 1145–1150.
8. **Левашова А.И.** Химическая технология углеродных материалов : учеб. пособие / А.И. Левашова, А.В. Кравцов. – Томск : ТПУ, 2008. – 112 с.
9. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий / **И.В. Пулинец, Е.Н. Панов, А.Я. Карвацкий** и др. – Київ : НТУУ «КПІ», 2014.
10. **Карвацкий А.Я.** Математична модель тепло-гідродинамічного стану багатоканальної печі при випалюванні електродних заготовок / А.Я. Карвацкий, І.В. Пулінець, І.Л. Шилович // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 1 (4). – С. 33–37.
11. **Шибалов С. Н.** Совершенствование тепловых процессов с целью повышения качества обжига заготовок из углеграфитовых материалов: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / С. Н. Шибалов. — М., 2004. — 30 с.
12. **Gerald F. Covanec.** Century Aluminium of West Virginia, AIME / F. Covanec. Gerald // Light Metals. — 2000. — P. 573—578.
13. **Чалых Е. Ф.** Оборудование электродных заводов : учеб. Пособие [для вузов] / Е. Ф. Чалых. – М. : Metallurgia, 1990. – 238 с.
14. **Санников А. К.** Производство электродной продукции [Текст] / А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др. – М.: Metallurgia,
15. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. «Энергия» 1977
16. **Богданов С.Н., Бурцев С.И., Иванов О.П., Куприянова А.В.** Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ./ Под ред. С.Н. Богданова. 4-е изд., перераб. и доп. — СПб.: СПбГАХИТ, 1999.- 320 с.

Рукопис подано до редакції 17.04.2018

УДК 622.267.5

В.А. ЧЕРЕДНИК, аспірантка

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

## ВУГІЛЬНА ПРОМИСЛОВОСТЬ УКРАЇНИ У РОЗРІЗІ СВІТОВИХ КЛІМАТИЧНИХ ЦІЛЕЙ

**Мета.** Метою роботи є комплексне дослідження сучасного стану вугільної промисловості України під час імплементації світових практик у сфері запобігання зміні клімату. Даний процес представить нові можливості для пошуку та впровадження інноваційних розробок у галузі видобутку, переробки викопних видів палива, виробництва, трансформації, постачання і споживання енергії, що зумовлює потребу у формуванні нової енергетичної політики держави.

**Методи.** Використовувався метод аналізу та узагальнення інформації щодо загальносвітових тенденцій розвитку паливно-енергетичного комплексу та впровадження їх відповідно до «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Одним з таких напрямків розвитку є добування шахтного метану вугільних родовищ, що дозволить вирішити одночасно кілька завдань: використовувати

© Чередник В.А., 2018