

**Жученко О.А.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Коротинський А.П.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ У БАГАТОКАМЕРНИХ ПЕЧАХ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

*Якісне управління процесом випалювання вуглецевих виробів шляхом зміни параметрів технологічного режиму дозволяє досягнути меншого виходу бракованої продукції. З використанням чисельного моделювання проведено дослідження особливостей процесу охолодження камери печі випалювання вуглецевих виробів. Досліджено залежність температурних полів камери печі та температури повітря на виході з камери від надлишку повітря, що подається на горіння палива. Досліджувались температури вуглецевих заготовок, пересипки та газового середовища у двох режимах роботи: при надлишку повітря  $a=1,1$  та  $a=1,2$ . Результати дослідження спрямовані на підвищення ефективності проведення кампанії випалювання в цілому.*

**Ключові слова:** випалювання, чисельне моделювання, надлишок повітря, температурні поля, процес охолодження.

**Вступ.** Вуглецеві вироби у вигляді графітованих електродів, ніпелів, вуглецевих блоків, анодів знайшли широке розповсюдження у різних галузях промисловості, зокрема металургійній, хімічній, металообробній, машинобудівній, нафтохімічній та інших.

Одним із основних технологічних процесів виробництва вуглецевих виробів є випалювання заготовок, тобто їх термічна обробка за температур 900–1300 °С з метою підвищення механічної міцності, термостійкості, електро- та теплопровідності тощо.

У зв'язку з цим підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів є актуальною науково-технічною задачею.

**Постановка проблеми.** Якість вуглецевих виробів визначається державним стандартом ДСТУ 4494:2005, технічними умовами ТУ У 27.9-00196204-005:2013, в яких висуваються вимоги до механічної міцності, термостійкості, електро- та теплопровідності, густини, пористості, модуля пружності, вмісту золи тощо. Всі ці показники у процесі випалювання заготовок повністю визначаються температурним режимом процесу [1, с. 1; 2, с. 2]. Тому дослідження температурних полів, що формуються у процесі випалювання за різних режимів його ведення, є важливим етапом, котрий передуює синтезу системи керування даним процесом, яка повинна забезпечити оптимальні експлуатаційні умови роботи.

На процес випалювання впливають декілька факторів: витрата палива, надлишок витрати повітря, рівень розрідження, яке створюється у камерах печі випалювання.

Як відомо, процес випалювання вуглецевих виробів проходить три стадії: нагрівання, «під вогнем» та охолодження. Метою цієї статті є дослідження температурних полів у процесі охолодження вуглецевих виробів під час їх випалювання [3, с. 2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багатокамерні печі є досить складним об'єктом, що і обумовлює велику кількість досліджень особливостей процесів, що протікають в них.

У роботах [2, с. 4; 3, с. 5; 4, с. 2] наведено дослідження впливу коефіцієнта поглинання димових газів, ступеня чорноти газових каналів, співвідношення між радіаційним і конвективним теплообміном, комбінованої пересипки, схеми завантаження камери печі, геометрії внутрішньої поверхні склепіння. Також представлені результати експериментальних досліджень трьох кампаній випалювання вуглеграфітової продукції у печах типу Рідгаммера з різними конструкціями і технологічними регламентами.

У праці [5, с. 2] наведено результати дослідження впливу швидкості підводу теплоти на якість кінцевої продукції та проведено співставлення температурних графіків печей відкритого

та закритого типу. Розглянуті такі фактори, як тривалість нагрівання та розмір заготовок на ступінь випалювання.

У монографії [6, с. 61] отримані результати експериментальних та теоретичних досліджень, що дозволяють визначити найбільш раціональні діапазони температур процесу випалювання. Наводяться результати промислового експерименту і математичного моделювання температурних режимів випалювання. Експериментально визначено залежність температури у тілі електрода від температури газової фази і режимних параметрів процесу випалювання.

У наведених вище роботах не розглядається процес охолодження камери печі як окремий складник кампанії випалювання та, відповідно, не розглядаються впливи керувальних технологічних параметрів на цей процес.

**Формулювання цілей статті.** Метою даної статті є дослідження температурних режимів процесу охолодження у багатокамерних печах випалювання вуглецевих виробів.

Дослідження полягають у визначенні:

- рівня температур заготовок за охолодження повітрям, що йде на спалювання;
- швидкості зміни мінімальної та максимальної температур в заготовках;
- перепаду температур в заготовках і по камері печі в цілому;
- дослідження впливу коефіцієнта надлишку повітря на процес охолодження заготовок і впливу на температурні поля камери.

**Виклад основного матеріалу.**

**Умови проведення дослідження.** Проводиться дослідження камери, в яку завантажено 5 заготовок діаметрами 700 мм та висотою 2100 мм. Прийнято, що початкова температура всіх складових частин касети печі складає 1273 К. Температура повітря 300 К. Відповідно до витрати палива 30 м<sup>3</sup>/год та складу природного газу, наведеного у таблиці 1, витрата повітря за надлишку  $\alpha = 1,2$  складає 339 м<sup>3</sup>/год, за надлишку  $\alpha = 1,1$  – 310,8 м<sup>3</sup>/год.

Таблиця 1

**Склад природного газу**

CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Сума
93.0	1.2	0.7	0.4	0.2	0.2	3	1	100

Для подальшого числового моделювання прийнято наведені в таблицях 2–5 фізичні властивості матеріалів печі випалювання та її завантаження відповідно до [7–9].

Таблиця 2

**Теплофізичні властивості вогнетривкого шамоту**

T, K	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Ср, Дж/(кг•К)	$\lambda$ , Вт/(м•К)
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 3

**Теплофізичні властивості матеріалу заготовок**

T, K	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Ср, Дж/(кг•К)	$\lambda$ , Вт/(м•К)
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 4

**Теплофізичні властивості теплоізоляційної шихти**

T, K	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Ср, Дж/(кг•К)	$\lambda$ , Вт/(м•К)
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	-

Для проведення досліджень було реалізовано геометрію касети печі випалювання розміром 3,8×0,76×4,05 м. Прийнято, що тривалість процесу випалювання 480 год., число камер на охолодженні – 1, число камер під вогнем – 1, число камер на підігріві димовими газами – 4, відповідно – темп випалювання складає 96 год.

Таблиця 5  
Теплофізичні властивості повітря

T, K	Ср, Дж/(кг•K)	λ, Вт/(м•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

З технології процесу випалювання вуглецевих матеріалів відомо, що необхідне для спалювання газу повітря проходить попередньо через камеру, в якій знаходяться вже обпалені заготовки з досить високою температурою (до 1000°C). Таким чином, повітря для спалювання природного газу нагрівається і подається до камери «під вогнем» з температурою 250–350°C. За умови збільшення кількості охолоджувальних камер температура повітря, що підігрівається, також підвищується і може досягати 600–800°C [6 с. 16].

Враховуючи те, що охолодження камери печі відбувається повітрям, яке у подальшому йде на горіння палива, для проведення чисельного моделювання процесу охолодження необхідно знати витрати повітря, потрібного для горіння палива, для чого треба провести відповідний розрахунок.

**Розрахунок витрати повітря.** Потрібна витрата повітря для горіння визначається з теоретичної витрати кисню, який входить у реакції окислення з урахуванням деякого надлишку, що забезпечує повне згоряння палива.

У розрахунках приймають такий склад повітря: азот – 79,0% і кисень – 21,0% за обсягом. Кількість вологи, що вноситься атмосферним повітрям, незначно збільшує витрату повітря і враховується (в основному під час розрахунку сушил) його вологовміст, виражений у вагових одиницях. Під час розрахунку печей вологість атмосферного повітря зазвичай не враховується.

Теоретично потрібна для горіння витрата повітря визначається таким чином [10, с. 24]:

$$L_0 = 4.76V_{O_2}, \quad (1)$$

де  $V_{O_2}$  – теоретично потрібна витрата кисню.

Теоретично потрібна витрата повітря для горіння природного газу розраховується за формулою [10, с. 24]:

$$L_0 = 0.0476(2 CH_4 + 3.5 C_2H_6 + 5 C_3H_8 + 6.5 C_4H_{10} + 8 C_5H_{12}) \quad (2)$$

де  $CH_4, C_2H_6 \dots$  – відсоткові відношення.

Дійсна витрата повітря з урахуванням коефіцієнта витрати повітря дорівнює [10, с. 25]:

$$L_a = aL_0, \quad (3)$$

де  $a$  – коефіцієнт витрати повітря, що показує відношення дійсної кількості повітря, введеного для горіння, до теоретично потрібного. Для газу та мазуту коефіцієнт витрати повітря  $a=1,05-1,20$  [8].

Якщо відома витрата палива  $V$ , то загальна витрата повітря, необхідного для спалювання палива, складе [10 с. 26]:

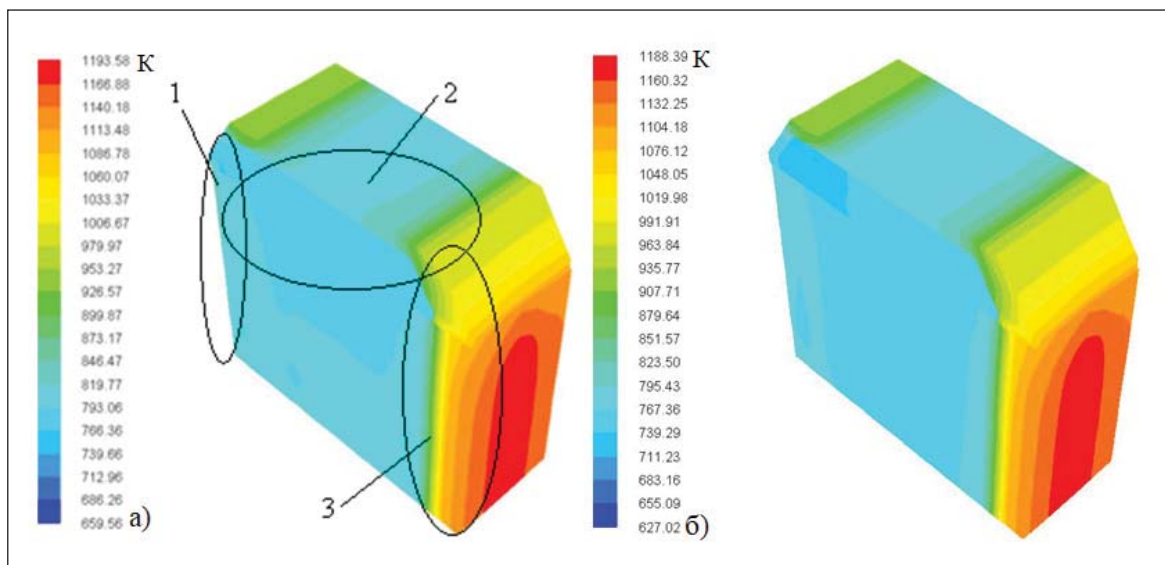


Рис. 1. Температурне поле касети наприкінці охолодження за надлишку повітря ((а) –  $a=1,1$ , (б) –  $a=1,2$ )

$$V_{\text{пог}} = BL_a \quad (4)$$

**Результати дослідження.** Максимальна температура по всьому об'ємові камери печі за  $a=1,1$  складає 1193 К, за  $a=1,2$  досягає 1188 К. Мінімальна температура за  $a=1,1$  – 739 К, за  $a=1,2$  – 683 К, що наведено на рис. 1. Відповідно, перепад температур по всьому об'ємові касети сягає 454 К та 505 К. Очевидним є той факт, що за умови збільшення витрати повітря температури по всьому об'ємові касети зменшуються, проте перепад температур збільшується.

Результати дослідження свідчать про наявність трьох особливих зон печі. Зона 1 – «холодна зона» печі – зона печі, де температура мінімальна. Наявність цієї зони обумовлена розташуванням газового каналу,

через який подається повітря. Саме тут «починається» охолодження касети, а тому і значення температур тут найменше. Зона 2 – «підсклепінчата зона» печі. Особливість цієї зони полягає у її розташуванні. У зв'язку з тим, що під склепінням печі завжди знаходиться велика кількість повітря, то і охолодження зони 2 відбувається досить інтенсивно порівняно з іншими частинами касети. Зона 3 – «гаряча зона» печі, наявність цієї зони обумовлена значною акумуляцією теплоти стінкою печі та її повільним охолодженням повітрям, температура якого значно вище у зв'язку з його нагріванням через проходження газового тракту печі. Тому і охолодження у цій зоні відбувається найдовше.

На рис. 2 представлені температурне поле пересипки наприкінці процесу охолодження при різних надлишках повітря. Як і у попередньому

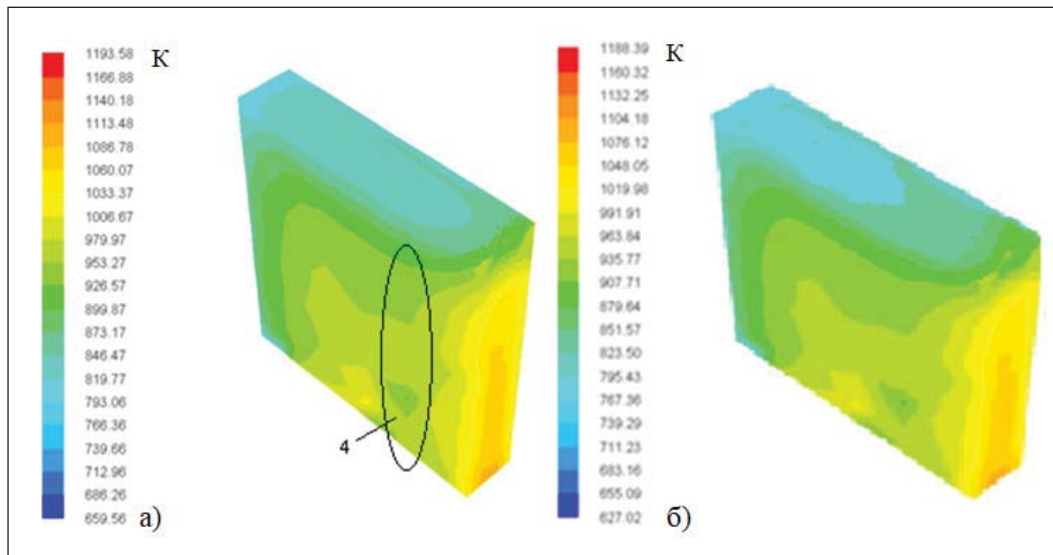


Рис. 2. Температурне поле касети наприкінці охолодження за надлишку повітря ((а)–  $a = 1,1$ , (б) –  $a = 1,2$ )

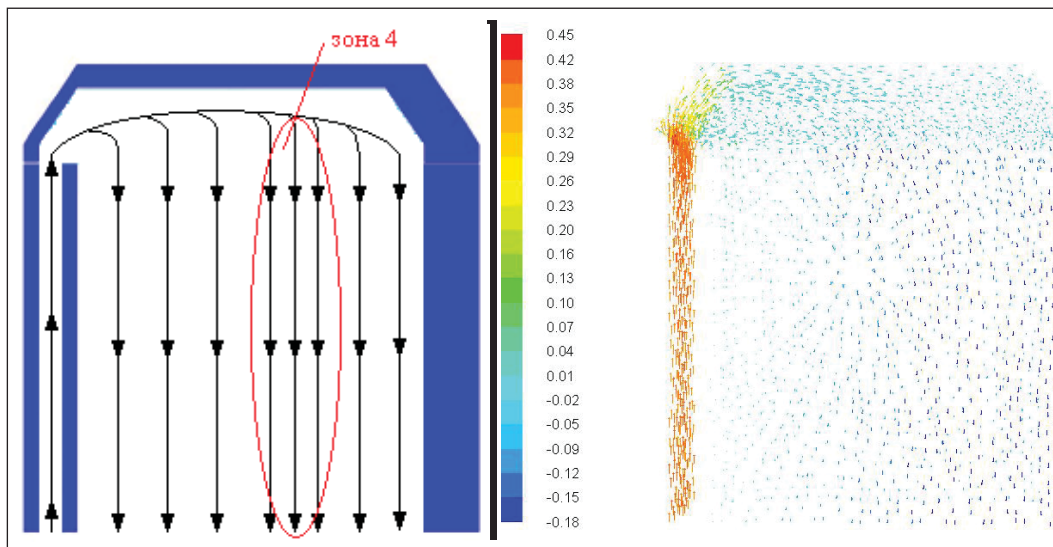


Рис. 3. Схематичне зображення руху повітря у газовому тракті печі випалювання

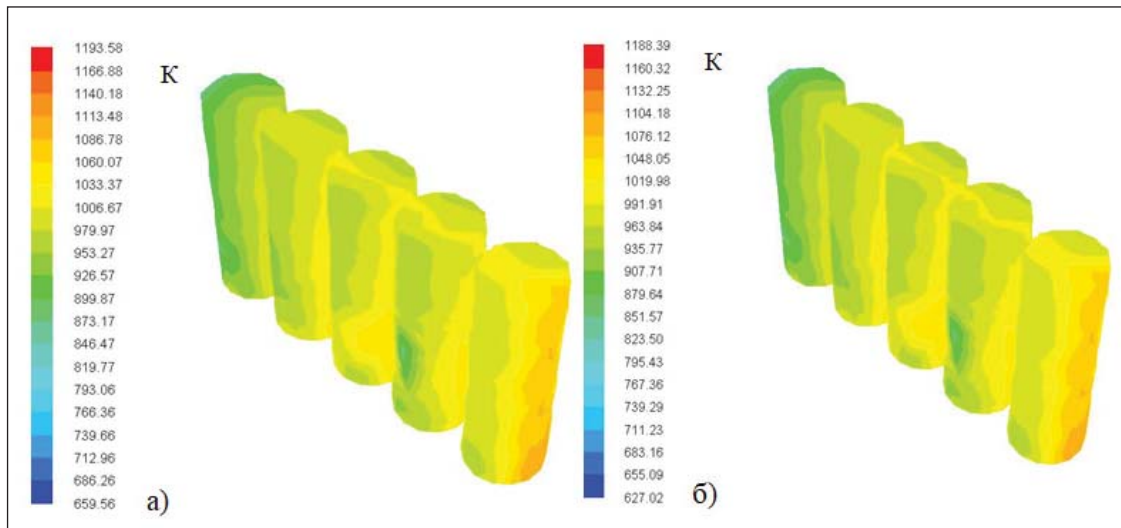


Рис. 4. Температурне поле касети наприкінці охолодження за надлишку повітря ((а)–  $a = 1,1$ , (б) –  $a = 1,2$ )

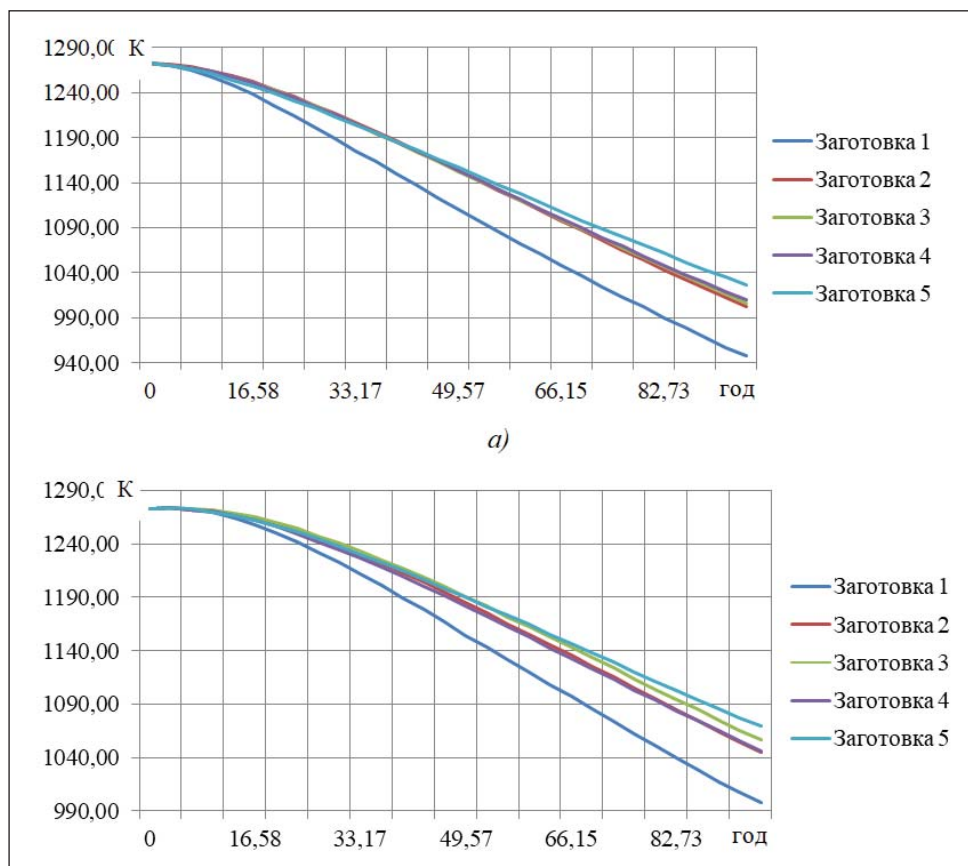


Рис. 5 Графік зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температур по заготовкам при надлишку повітря  $a = 1,1$

випадку, прослідковується наявність характерних зон печі, що описані вище. Додатково можна виділити четверту зону, що знаходиться ближче до гарячого краю печі, проте температури у цій зоні значно нижче. Це пояснюється особливістю руху повітря у газовому тракті (рис. 3).

Характер температурних полів в обох випадках майже однаковий та відрізняються лише значення температур. Значення перепаду температур по всьому об'єму пересипки складає близько 300 К.

Дослідження показали, що охолодження проходить інтенсивніше ближче до «холодної

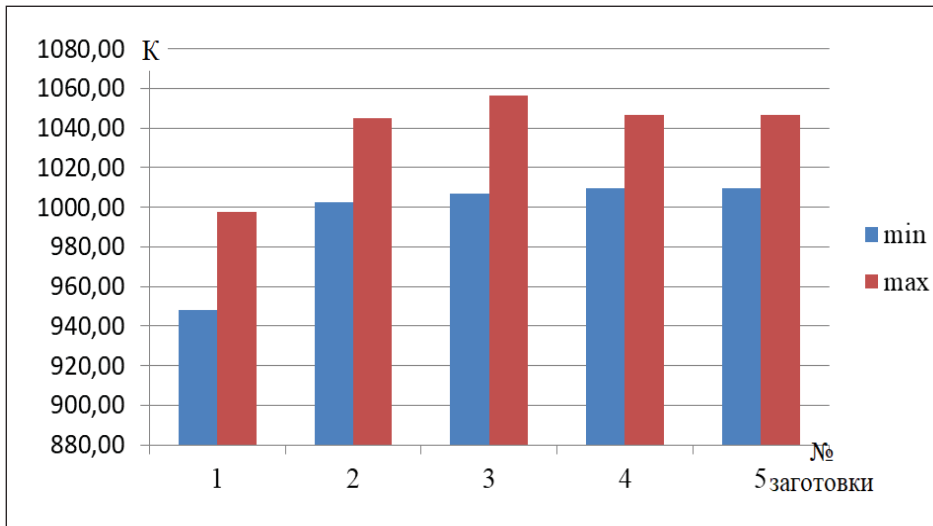


Рис. 6. Гістограма мінімальних та максимальних значень температури по заготовкам при надлишку повітря  $\alpha = 1,1$

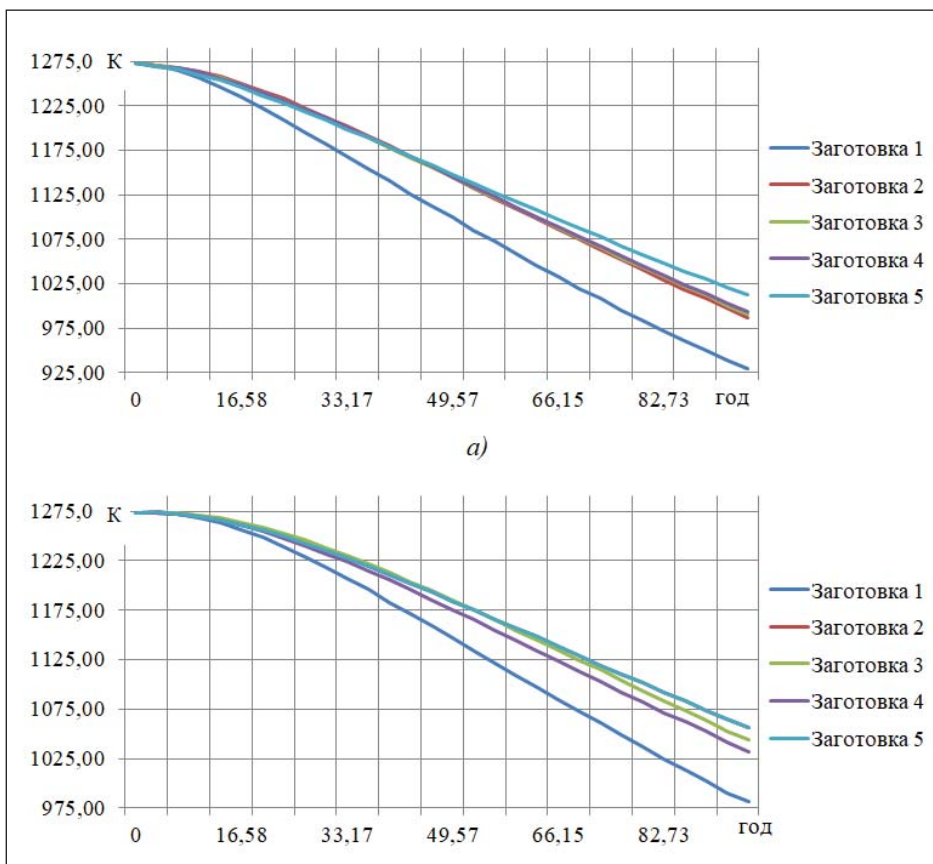


Рис. 7. Графік зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температури за заготовками за надлишку повітря  $\alpha = 1,2$

зони» та повільніше біля «гарячої зони» печі, що насамперед і обумовлює перепад температур по горизонталі. Наявність «підклепінчатої зони» печі та нагрів повітря під час проходження газових трактів обумовлює перепад температур по вертикалі. Очевидний значний

вплив четвертої зони на температуру заготовки № 4 (рис. 4).

На рис. 5 показана динаміка температур за заготовками у процесі охолодження за надлишку витрати повітря  $\alpha = 1,1$ . На рис. 6 – гістограми мінімальних та максимальних температур наприкінці

оохолодження за тих самих умов. На рис. 7 та рис. 8 відповідні результати за надлишку витрати повітря  $a = 1,2$ .

З отриманих результатів дослідження видно, що оохолодження заготовки № 4 відбувається інтенсивніше, ніж заготовки № 3, хоча вона розташована ближче до гарячої зони печі. Це підтверджує наявність четвертої зони печі та демонструє збільшення її впливу за збільшення надлишку витрати повітря.

Найбільш інтенсивне оохолодження заготовок відбувається в інтервалі 10–13 годин. Вочевидь, саме стільки часу потрібно, щоб оохолодити пересипку та стінки газового тракту.

Отримані результати числового моделювання показують, що протягом перших 3–4 годин відбувається нагрів заготовок оорієнтовно на 1–4 К. Це своєю чергою дозволяє говорити про існування ефекту «довипалювання» після етапу камери «під вогнем».

За збільшення витрати повітря збільшується перепад температур за заготовками, що ілюструється гістограмою 9. Середнє значення перепаду температур за  $a = 1,1$  складає 42,97 К, а за  $a = 1,2$  – 51,23 К

Важливим показником процесу оохолодження є температура повітря на виході з камери. Зміну температури повітря на виході з касети впродовж всього етапу оохолодження ілюструє рис. 10. З цього рисунку видно, що за меншої витрати повітря його температура на виході більша, що не протирічить фізиці процесів, які відбуваються.

Наведені вище результати не повністю характеризують ефективність процесу оохолодження. Саме тому доцільно розглянути витрати теплоти, що виходить з повітрям після оохолодження:

$$Q_{нов} = L_a i_{нов}^i,$$

де  $L_a$  – витрата повітря, що подається для горіння палива,  $i_{нов}^i$  – ентальпія повітря (залежить від температури). Результати представлені на рис. 11.

Очевидно, що при надлишку повітря  $a = 1,2$  витрата теплоти, що виходить з камери печі, зна-

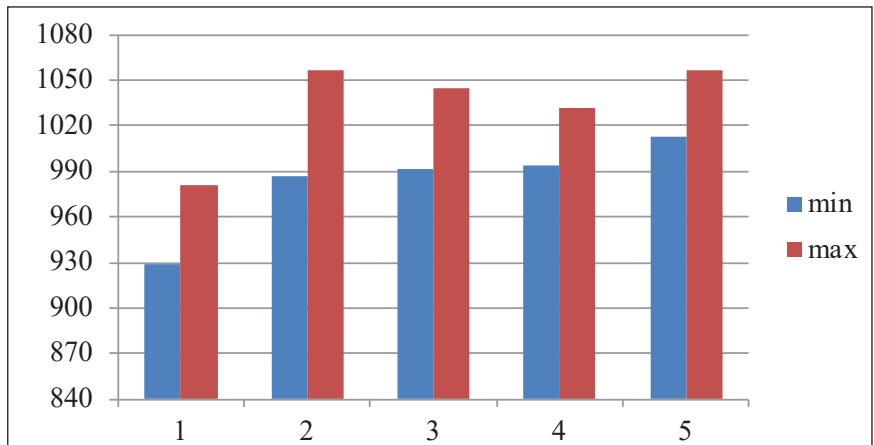


Рис. 8. Гістограма мінімальних та максимальних значень температури за заготовками за надлишку повітря  $a = 1,2$

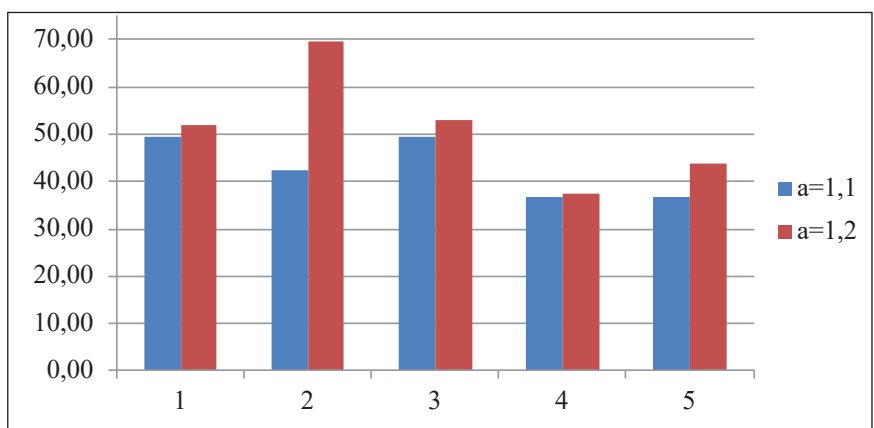


Рис. 9. Гістограма перепаду температур за заготовками за надлишку повітря  $a = 1,1$  та  $a = 1,2$

чно вище, що позитивно впливає на інтенсивність оохолодження. Крім того, при цьому більше теплоти буде внесено у камеру, яка знаходиться «під вогнем». Проте одночасно на спалювання подається повітря з меншою температурою, що призведе, своєю чергою, до зниження температури факелу. Як змінюється температура повітря після оохолодження заготовок у цьому діапазоні зміни коефіцієнта за витрати повітря  $a = 1,05 \dots 1,2$ , показано на рис. 12.

**Висновки.** Проведено дослідження температурних режимів процесу оохолодження у багатокамерних печах випалювання вуглецевих виробів.

Побудовані температурні поля пересипки та касети, що досліджувалась, загалом. Особливу увагу приділено дослідженню розподілу температур у заготовках, що оохолоджуються. Проаналізована динаміка температур за заготовками на протязі всієї кампанії оохолодження.

Розраховані мінімальні та максимальні температури заготовок та побудовані відповідні діаграми.

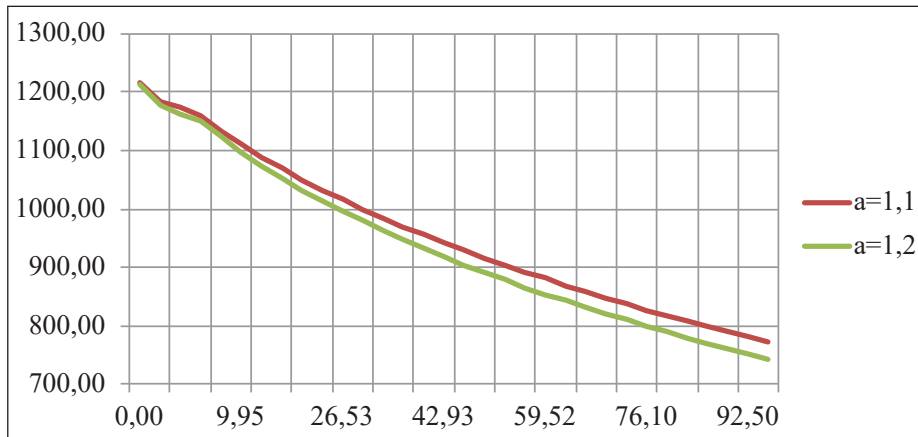


Рис. 10. Графік зміни середньої температури повітря на виході з касети за надлишку повітря  $a = 1,1$  та  $a = 1,2$

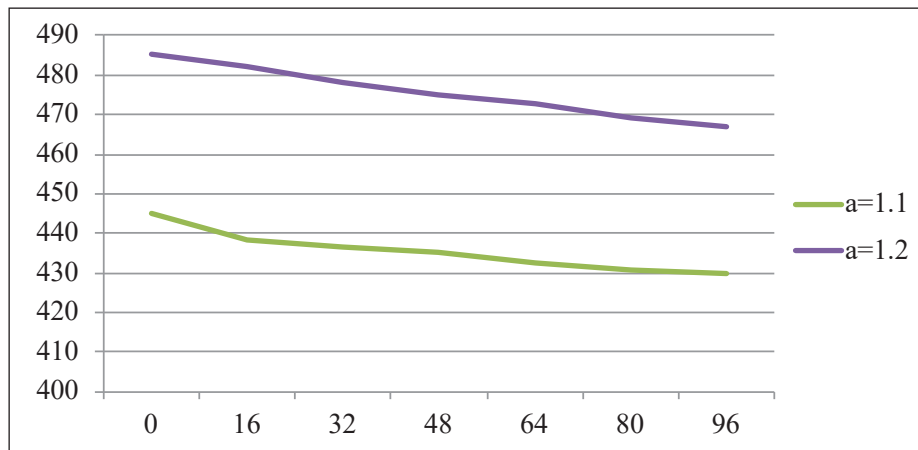


Рис. 11. Графік зміни витрати теплоти, що виходить з камери печі протягом всього процесу охолодження

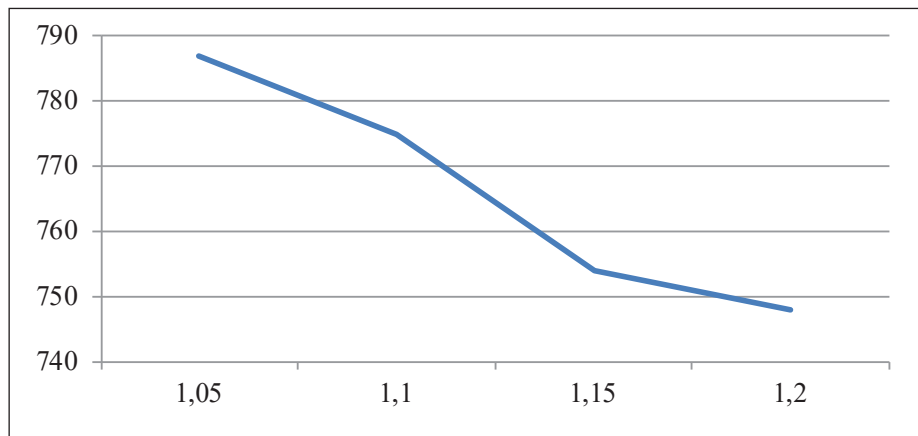


Рис. 12. Графік зміни температури підігрітого повітря від коефіцієнта надлишку повітря

Для оцінювання ефективності процесу охолодження розраховані витрати теплоти та кінцеві температури повітря, що виходить з камери охолодження за різних режимів роботи.

Отримані результати дослідження мають бути використані під час побудови системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів, що і є предметом подальших досліджень.



**Список літератури:**

1. Панов Е. Н., Карвацкий А. Я., Шилович И. Л., Лелека С. В., Пулинец И. В., Лазарев Т. В. Повышение эффективности обжига углеграфитовых заготовок. Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження: зб. наук. праць. 2011. №1 (7) С. 25—30.
2. Карвацкий А.Я., Лелека С.В., Пулинец И.В., Лазарев Т.В., Совершенствование регламентов обжига с учетом динамики газовой выделенной обжигаемых заготовок. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. № 6/5 (54). С. 42—45.
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. Шилович И.Л., Пулинец И.В. Расчетно-экспериментальное исследование процесса обжига углеграфитовых изделий в многокамерных печах. Зб. тез доп. XIII Міжн. науково-практ. конф. студ., асп. та мол. вчених “Екологія. Людина. Суспільство” НТУУ “КПІ”, 2010. С. 244—245.
5. Borzu Baharvand Mohebn Ameri Siahouei Mohammad Nabi Batoei Saeb Sadeghi Study on Anode Baking Parameters in Open-Top and Closed-Type Ring Furnaces Light Metals 2013 pp 1145-1150
6. Пулинец И.В., Панов Е.Н., Карвацкий А.Я., Лелека С.В., Лазарев Т.В., Чирка Т.В. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий., Київ НТУУ «КПІ» 2014
7. Сошкин Г.С. Исследование процесса обжига электродной продукции в многокамерных печах и разработка системы оптимального управления Владикавказ 2012.
8. Лутков А.И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов М.: Metallurgy, 1990. 175 с.
9. Угольные и графитовые электроды для электропечей и электролизеров. (Систематическое собрание патентов, сост. М. Б. Шварцберг). Л.-М., 1938.
10. Левченко П.В. Расчет печей и сушил силикатной промышленности Москва, Высшая школа, 1968. 363 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ В МНОГОКАМЕРНЫХ ПЕЧАХ ОБЖИГА УГЛЕРОДНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

*Качественное управление процессом обжига углеродных изделий путем изменения параметров технологического режима позволяет достичь меньшего выхода бракованной продукции. С использованием численного моделирования проведено исследование особенностей процесса охлаждения камеры печи обжига углеродных изделий. Исследована зависимость температурных полей камеры печи и температуры воздуха на выходе из камеры от избытка воздуха, подаваемого на горение топлива. Исследовались температуры углеродных заготовок, пересыпки и газовой среды в двух режимах работы: при избытке воздуха  $a=1,1$  и  $a=1,2$ . Результаты исследования направлены на повышение эффективности проведения кампании обжига в целом.*

**Ключевые слова:** обжиг, численное моделирование, избыток воздуха, температурные поля, процесс охлаждения.

**INVESTIGATION OF THE COOLING PROCESS IN MULTI CHAMBER FURNACE OF CARBON PRODUCTS BAKING**

*Qualitative management of the process of baking carbon products by changing the parameters of the technological routine allows to achieve a lower output of defective products. With the use of numerical modeling, the study of the features of the cooling process of the chamber of the baking furnace of carbon products has been carried out. The dependence of the temperature fields of the furnace chamber and the air temperature at the exit from the chamber from the excess air supplied to the combustion of fuel is studied. The temperature of carbon blanks and gas medium was investigated in two operating modes: with excess air  $a=1.1$  and  $a=1.2$ . The results of the study are aimed at increasing the effectiveness of the campaign of burning in general.*

**Key words:** baking, numerical modeling, excess air, temperature fields, cooling process.