

**О.А. Жученко, к.т.н., доц.****А.П. Коротинський, аспір.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### Дослідження впливу надлишку повітря на процес випалювання вуглецевих виробів у камері «під вогнем»

Якісне управління процесом випалювання вуглецевих виробів шляхом зміни параметрів технологічного режиму дозволяє досягнути меншого виходу бракованої продукції. Дослідження основних етапів процесу випалювання характеризується багатофакторністю моделі та нелінійністю зв'язку температурного поля і технологічних параметрів. Тому є важливим моделювання цих процесів з урахуванням максимальної кількості факторів впливу, яке дозволить мінімізувати час та вартість виробництва готової продукції.

Проведено дослідження впливу надлишку повітря на температурний режим камери печі випалювання при роботі «під вогнем». Проаналізовано закономірності зміни перепаду температур по заготовкам при різних режимах ведення процесу. Виявлено характерні зони печі з мінімальною та максимальною температурами. Досліджено якість процесу горіння палива через масові долі продуктів горіння.

Проведено дослідження впливу надлишку витрати повітря на температурний режим роботи однієї камери печі випалювання. Досліджувались температури вуглецевих заготовок, пересипки та газового середовища у двох режимах роботи: при надлишку повітря  $a = 1,1$  та  $a = 1,2$ .

Основну увагу дослідження було приділено питанням однорідності температурного поля заготовок, що суттєво впливає на їх якість.

Показано, що надлишок витрати повітря доцільно підтримувати на нижній границі припустимих значень.

**Ключові слова:** горіння; випалювання; температурні поля; надлишок повітря, вуглецеві вироби.

**Постановка проблеми.** Вуглецеві вироби у вигляді графітованих електродів, ніпелів, вуглецевих блоків, анодів знайшли широке розповсюдження у різних галузях промисловості: металургійній, хімічній, металообробній, машинобудівній, нафтохімічній тощо.

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

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. Усі ці показники у процесі випалювання заготовок повністю визначаються температурним режимом процесу [1–2]. Тому дослідження температурних полів, що формуються у процесі випалювання при різних режимах його ведення є важливим етапом, котрий передуює синтезу системи керування даним процесом, яка має забезпечити оптимальні експлуатаційні умови роботи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні та експериментальні дослідження теплофізичних процесів, що відбуваються під час випалювання вуглецевих виробів, наведено у роботах [3–6]. Проведено 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.

У роботі [7] описано вплив сполучного матеріалу, виду наповнювача та його гранулометричного складу, швидкості нагріву, кінцевої температури випалювання на процес випалювання.

Авторами [8] досліджено вплив зміни теплофізичних властивостей грюючих газів і матеріалів печі, схем завантаження та конструкції камери печі на процес випалювання електродної продукції у багатокамерних печах випалювання.

Відповідно до [9] наведено результати вивчення динаміки газовиділення і зміни властивостей при випалюванні заготовок, виготовлених на середньо- і високотемпературному печі.

У наведених вище роботах не розглядається етап камери «під вогнем», як окрема складова кампанії випалювання та, відповідно, не розглядаються впливи керуючих технологічних параметрів, що впливають на даний процес.

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

**Метою** даної статті є дослідження впливу надлишку повітря на стан температурних полів, що формуються у процесі випалювання, а також виявлення зон із мінімальними та максимальними температурами.

**Викладення основного матеріалу.** Опис умов дослідження. Процес випалювання вуглецевих виробів відбувається у багатоканерній кільцевій закритій печі випалювання типу Riedhammer [10–11]. У даній роботі розглядається одна із камер печі, яка завантажена з ліво на право п'ятьма заготовками діаметрами 300, 400, 500, 600, 700 мм та висотою 2100 мм.

Досягнення робочих температур відбувається за рахунок згорання природного газу та повітря. Дійсна витрата сухого повітря, з урахуванням коефіцієнта витрати, дорівнює [12]:

$$L_a = aL_0 \quad (1)$$

де  $a$  – коефіцієнт витрати повітря, що показує відношення дійсної кількості повітря, введеного для горіння, до теоретично потрібного  $L_0$ . Для газу та мазуту коефіцієнт витрати повітря  $a = 1,05–1,20$  [12].

У зв'язку з тим, що виконати дослідження, задачі якого сформульовані вище, на промисловому обладнанні неможливо з технічних та економічних причин, як метод дослідження використовувалося математичне моделювання на основі моделі, що містить у собі такі рівняння: нерозривності, збереження кількості руху, транспорту хімічних компонентів реакції горіння, енергії в ентальпійному вигляді, турбулентної кінетичної енергії та швидкості її дисипації. Теплообмін у газовому тракті печі є складним радіаційно-конвективним, а у твердих конструкціях печі – здійснюється за рахунок теплопровідності [13]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_k) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(V_{k,i} Y_k) + \dot{\omega}_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho h_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h_s) = \dot{\omega}_T + \frac{D_p}{D_t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}) - \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \sum_{k=1}^N V_{k,i} Y_k h_{s,k}) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

де  $\rho$  – щільність;  $t$  – час;  $u_i$  – компоненти швидкості;  $p$  – тиск;  $\tau_{ij}$  – тензор напружень;  $Y_k$  – масова частка компоненти хімічної реакції горіння;  $V_{k,i}$  – дифузійна швидкість  $k$ -го компонента;  $\dot{\omega}_k$  – швидкість реакції  $k$ -го компонента;  $h_s$  – ентальпія;  $\dot{\omega}_T$  – об'ємне джерело теплоти за рахунок горіння;  $D_p/D_t$  – субстанціональна похідна від тиску;  $D_t$  – коефіцієнт турбулентної дифузії;  $\lambda$  – теплопровідність;  $T$  – температура.

Для подальшого чисельного моделювання прийнято наведені у таблиці 1–4 фізичні властивості матеріалів печі випалювання та її завантаження, відповідно до [14–16]:

Таблиця 1

Теплофізичні властивості вогнетривкого шамоту

T, K	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Ср, Дж/(кг·K)	$\lambda$ , Вт/(м·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	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Ср, Дж/(кг·K)	$\lambda$ , Вт/(м·K)
273	1635	690	8
400	1635	893	–
500	1635	1160	8,3

Закінчення таблиці 2

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

Таблиця 4

## Теплофізичні властивості повітря

T, K	Ср, Дж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)
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

За початкову температуру повітря, природного газу, заготовок, пересипки та інших складових печі прийнято 300 К. Вміст у природному газі  $\text{CH}_4$  – 96 %, вміст кисню у повітрі – 24 %. Тривалість горіння 480 годин.

Дослідження впливу надлишку повітря на процес випалювання вуглецевих виробів відбувається як порівняння результатів моделювання при різному надлишку повітря, а саме при  $a = 1,2$  та  $a = 1,1$ .

Дослідження 1 (при надлишку повітря  $a = 1,2$ ). Як видно з результатів моделювання, наприкінці кампанії випалювання має місце холодна область печі. Найвищою є температура стінок вогневого колодязя (близько 1360 К), мінімальною – температура протилежної стінки (приблизно 1280 К). Перепад температури по всьому об'ємі камери печі сягає 80 К.

Максимальний горизонтальний перепад температури по середині камери при розрізі навпіл становить 76 К, а вертикальний 26 К (рис. 2). Незначний перепад температури по камері печі пояснюється наявністю розрідження та надлишку повітря, що зумовлює додатковий тиск по об'єму камери у результаті горіння палива.

У результаті повного прогріву камери печі присутній незначний перепад температур по всьому об'ємі заготовок (рис. 3). Температура заготовок приймає значення 1283–1359 К.

Графіки зміни середніх температур в заготовках протягом всієї кампанії випалювання представлено на рисунку 4.

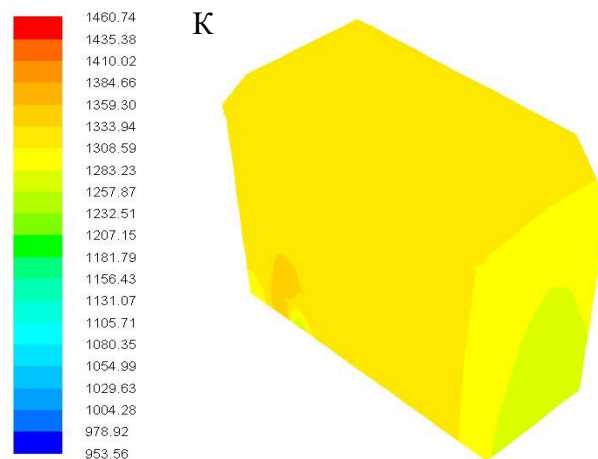


Рис. 1. Температурне поле камери печі

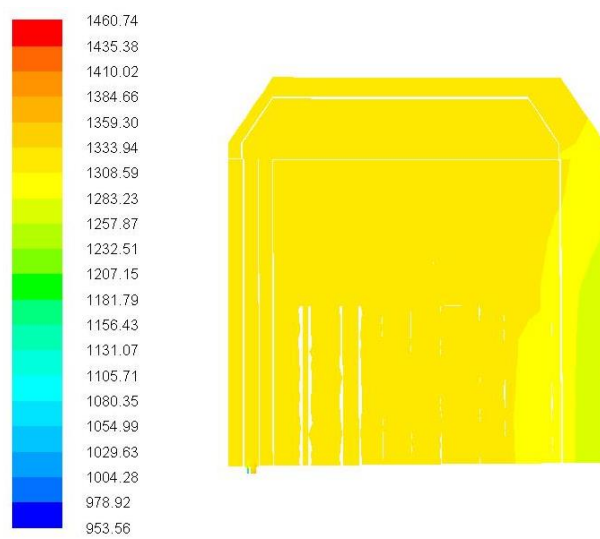


Рис. 2. Температурне поле при зрізі на половині камери печі

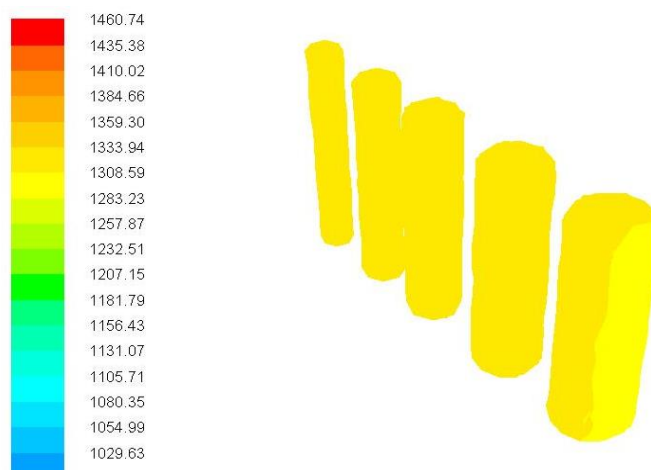


Рис. 3. Температурні поля заготовок

Як видно з рисунку 4, найдовше нагрівається заготовка 5. Це можна пояснити розташуванням цієї заготовки у холодній області печі, де значення температур значно нижче.

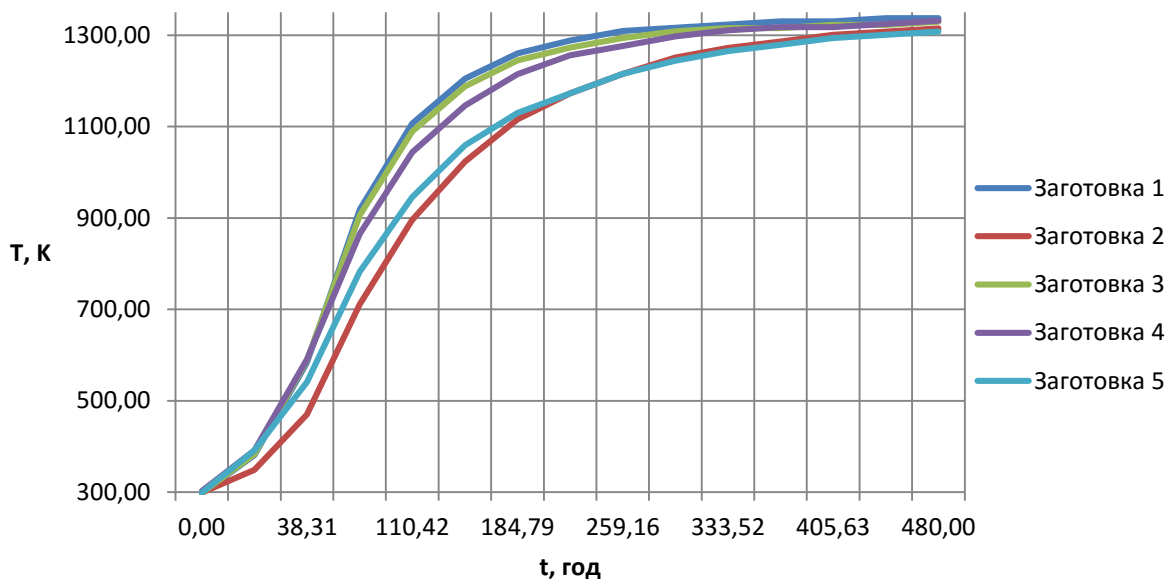


Рис. 4. Графік зміни середньої температури по заготовкам

Графіки зміни мінімальної та максимальної температури у газовому середовищі камери печі показано на рисунку 5. З графіків видно, що мінімальна та максимальна температура стрімко змінюються у діапазоні 10–60 годин. Це можна пояснити тим, що саме у цей період відбувається процес нагріву стінок вогневого колодязя. При цьому газ, який ще не згорів, та повітря підігріваються за рахунок акумульованої теплоти стінок колодязя, та процес горіння відбувається не з початковою температурою 300 К, а дещо вище. Після повного підігріву стінок вогневого колодязя (після 60 годин) значної зміни температури по газовому середовищу не відбувається.

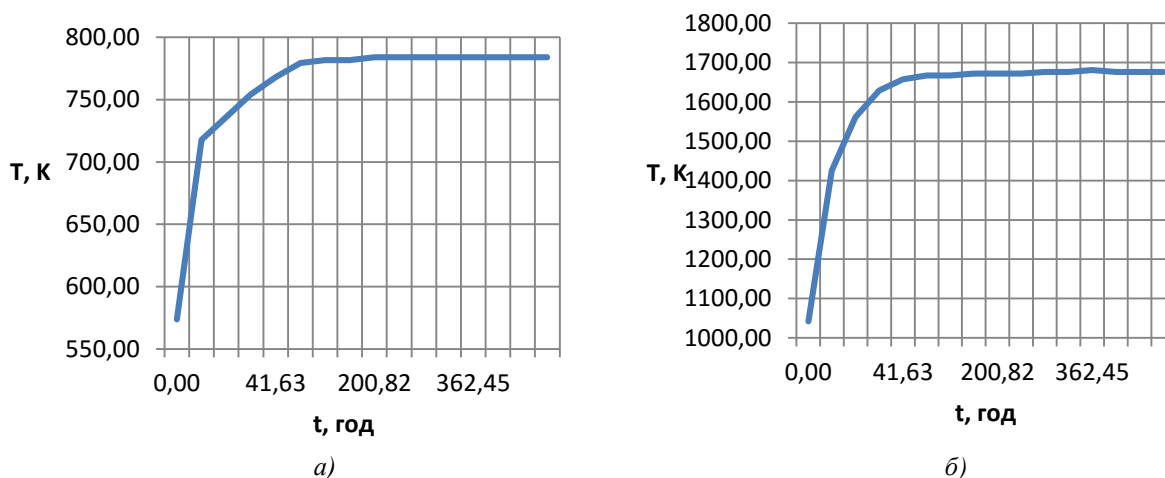


Рис. 5. Графіки зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температур у газовому середовищі камери

Масова доля  $\text{CH}_4$  приймає максимальне значення лише у вогневому колодязі, де саме і відбувається його горіння. Обставина, що на виході з камери печі вміст  $\text{CH}_4$  становить 0 %, підтверджує факт повного згорання палива.

Мінімальне значення вмісту кисню спостерігається у зоні інтенсивного горіння палива (рис. б). Проте по всьому об'єму газового тракту вміст кисню зменшується з верхньої частини газового колодязя до виходу з камери, що пояснюється допалюванням продуктів горіння, що підтверджується на рисунку б.

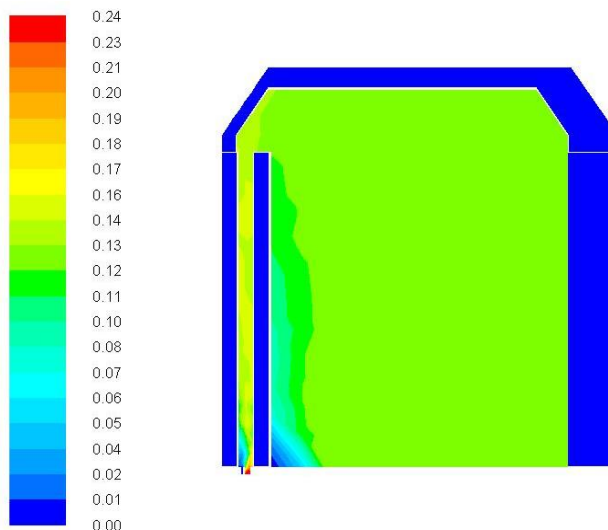


Рис. 6. Масова доля кисню

При надлишку повітря  $a = 1,2$  відбувається повне згорання палива. Проте, враховуючи наявність масової долі кисню на виході з печі, доцільно надлишок повітря зменшити.

Дослідження 2 (при надлишку повітря  $a = 1,1$ ). На рисунку 7 наведено температурне поле камери печі при надлишку повітря  $a = 1,1$ . Порівняно з попереднім дослідженням, видно, що максимальна температура по всьому об'ємі камери печі вища, ніж при надлишку повітря  $a = 1,2$ . Це можна пояснити тим, що кількість повітря при початковій температурі, що подається у камеру печі, менша. Відповідно, зменшується охолодження за рахунок підводу повітря з нижчою температурою.

Найвищою є температура стінок вогневого колодязя (приблизно 1530 K), мінімальною є температура протилежної стінки (приблизно 1055 K). Перепад температури по всьому об'ємі камери печі сягає 150 K.

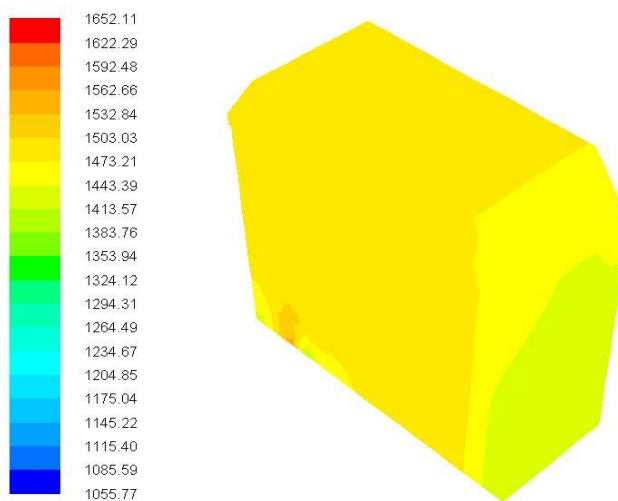


Рис. 7. Температурне поле камери печі

З наведених на рисунку 8 температурних полів та їх порівняння з відповідними результатами попереднього дослідження, можна зробити висновок, що максимальна температура для даного дослідження значно вище, ніж у попередньому. Проте збільшується неоднорідність температурного поля, що пояснюється збільшенням температури теплоносія та зменшенням його кількості. Горизонтальний перепад температури по середині камери, при розрізі навпіл, становить 120 K, а вертикальний 27 K.

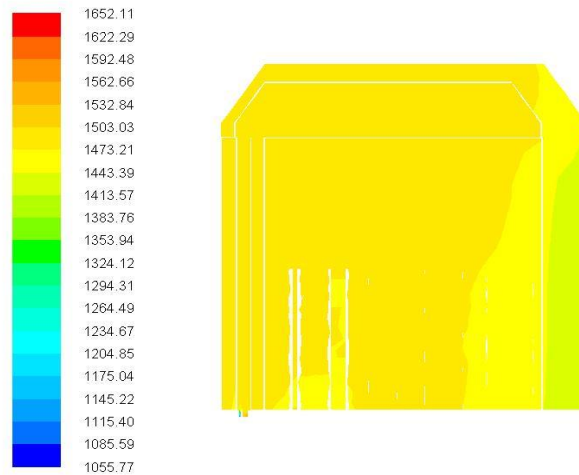


Рис. 8. Температурне поле у зрізі на половині камери печі

На рисунку 9 наведено температурне поле заготовок. У результаті повного прогріву камери печі присутній перепад температур по всьому об'ємі заготовок (біля 60 К). Температура заготовок приймає значення 1443–1503 К.

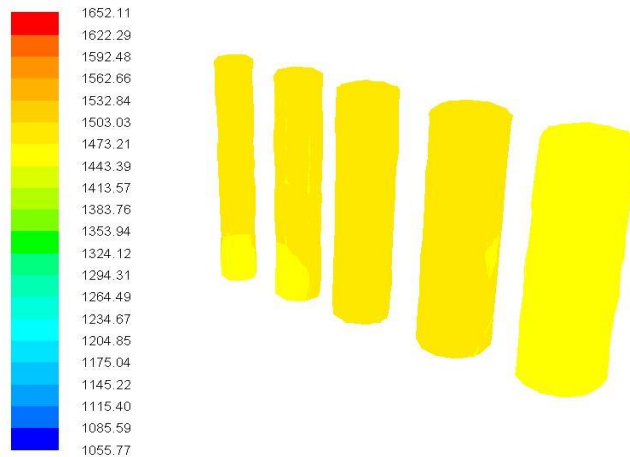


Рис. 9. Температурні поля заготовок

Графіки зміни середніх температур в заготовках протягом всієї кампанії випалювання представлено на рисунку 10. З представлених даних видно, що температура у заготовках змінюється повільніше, ніж у попередньому дослідженні, адже при зменшенні витрати повітря зменшується кількість димових газів, що представляють собою теплоносії.

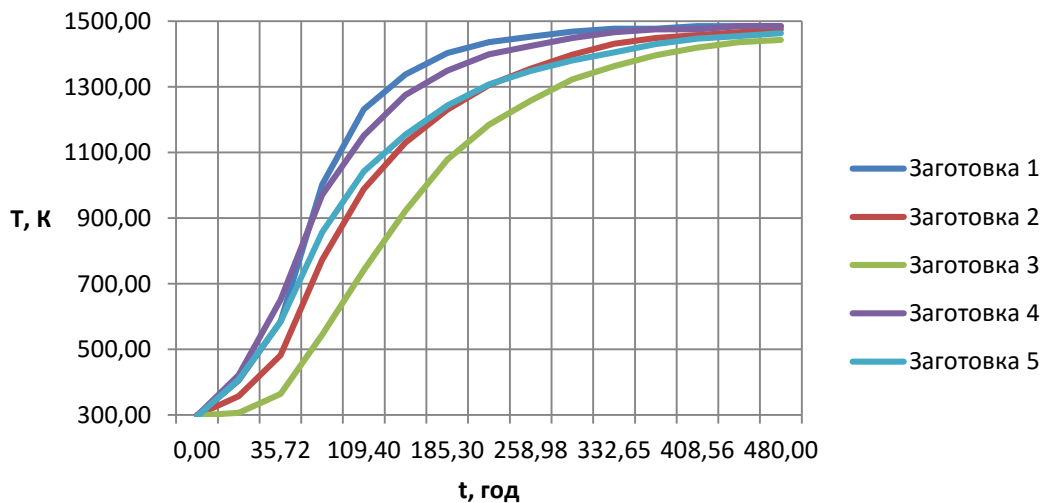


Рис. 10. Графік зміни середньої температури по заготовкам

Графіки зміни мінімальної та максимальної температури у газовому середовищі камери печі показано на рисунку 11.

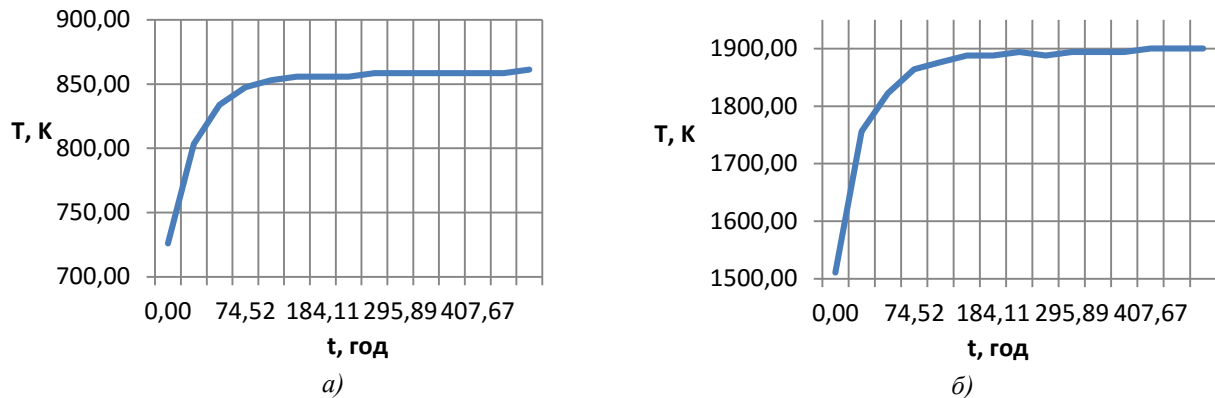


Рис. 11. Графіки зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температур у газовому середовищі камери

Як і у попередньому дослідженні, мінімальна та максимальна температура стрімко змінюються у діапазоні 10–60 годин.

Масова доля  $\text{CH}_4$  приймає максимальне значення лише у вогневому колодязі, на виході з камери печі вміст  $\text{CH}_4$  становить 0 %, що підтверджує факт повного згорання палива.

Мінімальне значення вмісту кисню спостерігається у зоні інтенсивного горіння палива (рис. 12). Проте по всьому об'ємі газового тракту вміст кисню зменшується з верхньої частини газового колодязя до виходу з камери. Порівняно з попереднім дослідженням масова доля кисню на виході з печі становить 8 %, що свідчить про можливе подальше зменшення подачі повітря.

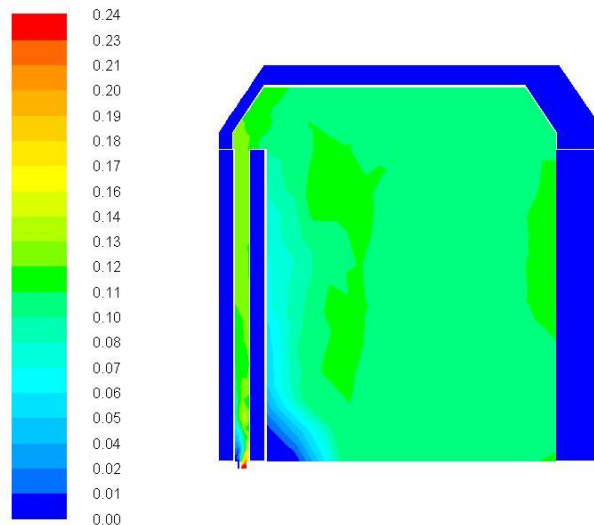


Рис. 12. Масова доля кисню

Потрібно враховувати той факт, що кількість кисню на виході з камери печі також залежить і від конструкції паливоспалювальних пристроїв, що в цілому не розглядається у даних дослідженнях.

**Висновки.** Проведено дослідження впливу надлишку витрати повітря на температурний режим роботи однієї камери печі випалювання. Досліджувались температури вуглецевих заготовок та газового середовища у двох режимах роботи: при надлишку повітря  $a = 1,1$  та  $a = 1,2$ .

У результаті проведеного математичного моделювання визначено зони з найбільшою та найменшою температурами. Найвищою є температура стінок вогневого колодязя 1360 K при  $a = 1,2$  та 1530 K при  $a = 1,1$ , мінімальною – температура протилежної стінки 1280 K та 1380 K при  $a = 1,2$  та  $a = 1,1$  відповідно.

Основну увагу дослідження було приділено питанням однорідності температурного поля, що суттєво впливає на їх якість кінцевої продукції. Перепад температури по всьому об'ємі камери печі сягає 80 K та 150 K за надлишку повітря  $a = 1,2$  та  $a = 1,1$  відповідно.



Масова доля  $\text{CH}_4$  на виході з камери печі становить 0 %, що підтверджує факт повного згорання палива у обох дослідженнях, а вміст кисню 8 % при надлишку  $a = 1,1$  зумовлює можливість зменшення витрати повітря.

Збільшення надлишку повітря на 9 % призвело до збільшення середньої температури заготовок на 143 К.

Подальші дослідження мають бути присвячені дослідженню температурних полів процесу випалювання вуглецевих виробів при зміні інших факторів – розрідження та витрати палива.

#### Список використаної літератури:

1. Сухоруков И.Ф. Температурный график обжига заготовок в многокамерных печах / И.Ф. Сухоруков // Цветная металлургия. – 1963. – № 22.
2. Молокова Т.Л. Исследование обжига углеграфитовых заготовок / Т.Л. Молокова, Г.Д. Харлампович, И.Ф. Сухоруков // Химия твердого топлива. – 1977. – № 6. – С. 114–120.
3. 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.
4. 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.
5. Шилович И.Л. Расчетно-экспериментальное исследование процесса обжига углеграфитовых изделий в многокамерных печах / И.Л. Шилович, И.В. Пулинец // Зб. 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.
6. Study on Anode Baking Parameters in Open-Top and Closed-Type Ring Furnaces / V.Borzi, A.Mohesn, M.Siahouei, B.Nabi, S.Saeb // Light Metals. – 2013. – Pp 1145–1150.
7. Левашова А.И. Химическая технология углеродных материалов : учеб. пособие / А.И. Левашова, А.В. Кравцов. – Томск : ТПУ, 2008. – 112 с.
8. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий / И.В. Пулинец, Е.Н. Панов, А.Я. Карвацкий и др. – Київ : НТУУ «КПІ», 2014.
9. Изучение динамики газовой выделенной и изменения свойств при обжиге заготовок, изготовленных на средне- и высокотемпературном печах / А.С. Смирнова, М.А. Рысс, Г.В. Дмижриева, Н.А. Баженов // Цветные металлы. – 1965. – № 11. – С. 90–93.
10. Производство электродной продукции / А.К. Санников, А.Б. Сомов, В.В. Ключников и др. – М. : Металлургия, 1985. – 129 с.
11. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов / Е.Ф. Чалых. – М. : Металлургия, 1990. – 238 с.
12. Левченко П.В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности / П.В. Левченко. – М. : Высшая школа, 1968. – 363 с.
13. Карвацкий А.Я. Математична модель тепло-гідродинамічного стану багатокамерної печі при випалюванні електродних заготовок / А.Я. Карвацький, І.В. Пулінець, І.Л. Шилович // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 1 (4). – С. 33–37.
14. Лутков А.И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов / А.И. Лутков. – М. : Металлургия, 1990. – 175 с.
15. А. с. 1755025 СССР. Способ укрытия теплоизоляционной шихты печи графитации / П.П. Савко, В.П. Овсянников (СССР). – Открытия. Изобретения ; опубл. 1992, Бюл. № 30.
16. Угольные и графитовые электроды для электропечей и электролизеров : систематическое собрание патентов / Сост. М.Б. Шварцберг. – Л. : М., 1938.

#### References:

1. Suhorukov, I.F. (1963), «Temperaturnyj grafik obzhiga zagotovok v mnogokamernyh pechah», *Cvetnaja metallurgija*, No. 22.
2. Molokova, T.L., Harlampovich, G.D. and Suhorukov, I.F. (1977), «Issledovanie obzhiga uglegrafitovyh zagotovok», *Himija tverdogo topliva*, No. 6, pp. 114–120.
3. Karvackij, A.Ja., Leleka, S.V. and Pulinec, I.V. and others (2011), «Sovershenstvovanie reglamentov obzhiga s uchetom dinamiki gazovydelenija obzhigaemyh zagotovok», *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij*, No. 6/5 (54), pp. 42–45.
4. Panov, Ye.N., Kutuzov, S.V., Karvatsky, A.Ya., Shilovich, I.L., Vasilchenko, G.N., Shilovich, T.B., Leleka, S.V., Danilenko, I.V., Pulinets, T.V. and Chirka, T.V. (2011), «LazarevPower 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»*, from 7–9 Sept., Proceedings of the Intern. Congress, «Verso», Krasnoyarsk, Russia, pp. 412–423.
5. Shilovich, I.L. and Pulinec, I.V. (2010), «Raschetno-jeksperimental'noe issledovanie processa obzhiga uglegrafitovyh izdelij v mnogokamernyh pechah», *Zb. Tez dop. XIII Mizhn. naukovoprakt. konf. stud., asp. ta mol. vchenih «Ekologija. Ljudina. Suspil'stvo»*, vid 19–23 travnja, NTUU «KPI», Kiiv, pp. 244–245.

6. Borzu, B., Mohesn, A., Siahouei, M., Nabi, B. and Saeb, S. (2013), «Study on Anode Baking Parameters in Open-Top and Closed-Type Ring Furnaces», *Light Metals*, pp. 1145–1150.
7. Levashova, A.I. and Kravcov, A.V. (2008), *Himicheskaja tehnologija uglerodnyh materialov*, TPU, Tomsk, 112 p.
8. Pulinec, I.V., Panov, E.N., Karvackij, A.Ja., Leleka, S.V., Lazarev, T.V. and Chirka, T.V. (2014), *Teploobmen v mnogokamernyh pechah obzhiga uglegrafitovyh izdelij*, NTUU «KPI», Kіiv.
9. Smirnova, A.S., Ryss, M.A., Dmizhrieva, G.V. and Bazhenov, N.A. (1965), «Izuchenie dinamiki gazovydelenija i izmenenija svojstv pri obzhige zagotovok, izgotovlennyh na sredne- i vysokotemperaturnom pechah», *Cvetnye metally*, No. 11, pp. 90–93.
10. Sannikov, A.K., Somov, A.B., Kljuchnikov, V.V. and others (1985), *Proizvodstvo jelektroodnoj produkcii*, Metallurgija, Moskva, 129 p.
11. Chalyh, E.F. (1990), *Oborudovanie jelektroodnyh zavodov*, Metallurgija, Moskva, 238 p.
12. Levchenko, P.V. (1968), *Raschety pechej i sushil silikatnoj promyshlennosti*, Vysshaja shkola, Moskva, 363 p.
13. Karvac'kyj, A.Ja., Pulinec', I.V. and Shylovyh, I.L. (2012), «Matematychna model' teplo-gidrodinamichnogo stanu bagatokamernoi' pechi pry vypaljuvanni jelektroodnyh zagotovok», *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologyj*, No. 1 (4), pp. 33–37.
14. Lutkov, A.I. (1990), *Teplovyje i jelektricheskie svojstva uglerodnyh materialov*, Metallurgija, Moskva, 175 p.
15. Sapko, P.P. and Ovsjannikov, V.P., SSSR (1992), *Sposob ukrytija teploizoljacionnoj shihty pechi grafitacii* [Method of covering the heat-insulating charge of the graphitization furnace], A.s. N 1755025, Otkrytija. Izobretenija, Bjul. № 30.
16. Shvarcberg, M.B. (ed.) (1938), *Ugol'nye i grafitovyje jelektrody dlja jelektropechej i jelektrolizerov*, sistematicheskoe sobranie patentov, Leningrad, Moskva, Russia.

**Жученко** Олексій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- адаптивні системи керування;
- математичне моделювання.

Тел.: (067) 770–39–96;

(044) 204–91–48.

E-mail: azhuch@ukr.net.

**Коротинський** Антон Петрович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- адаптивні системи керування;
- математичне моделювання.

Тел.: (093) 314–61–13.

E-mail: ihfantkor@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 13.03.2018.