

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ

УДК 66.03

doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142550

© Жученко О.А.<sup>1</sup>, Коротинський А.П.<sup>2</sup>

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОЧАТКОВОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ НА ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ У КАМЕРІ «ПІД ВОГНЕМ»

Якісні показники продукції випалювання в повній мірі визначається через зміну параметрів технологічного режиму кампанії випалювання вуглецевих виробів. Декомпозиції кампанії випалювання на ключові етапи випалювання, дослідження зв'язку температурних полів 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, та є важливим етапом розробки системи керування даним процесом, яка повинна забезпечувати вихід готової продукції відповідної якості. На основі методу чисельного моделювання проведено дослідження впливу початкової температури повітря, що подається для горіння палива у камеру «під вогнем», на температурний режим процесу випалювання вуглецевих виробів. Показано, що зміна початкової температури повітря суттєво впливає на температурні поля процесу випалювання. Виявлено закономірності зміни середнього значення перепаду температур по заготовкам при різних режимах роботи. Основну увагу дослідження було приділено питанням однорідності температурного поля заготовок, що суттєво впливає на їх якість. Результати дослідження показали, що збільшення початкової температури призводить до можливості зменшення витрат природного газу, що покращує техніко-економічні показники процесу, проте викликає збільшення перепадів температур у заготовках, які випалюються, що може призвести до браку готової продукції. З результатів даного дослідження впливає задача для подальших досліджень – розробити алгоритм визначення оптимальної початкової температури повітря з урахуванням як умов енергоефективності процесу випалювання, так і забезпечення потрібної якості готової продукції.

**Ключові слова:** чисельне моделювання, процес випалювання, температурні поля, початкова температура повітря.

**Жученко А.А., Коротинський А.П. Исследование влияния начальной температура воздуха на температурный режим процесса обжига углеродных изделий в камере «под огнем».** Качественные показатели продукции обжига в полной мере определяются через изменение параметров технологического режима кампании обжига углеродных изделий. Декомпозиции кампании обжига на ключевые этапы, исследование связи температурных полей печи в зависимости от технологических параметров и их рациональное использование позволяет достичь меньшего выхода бракованной продукции. Поэтому важно моделирование этих процессов с учетом максимального количества факторов влияния, которое позволит минимизировать время и стоимость производства готовой продукции, и является важным этапом разработки системы управления данным процессом, которая должна обеспечивать вы-

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, [azhuch@ukr.net](mailto:azhuch@ukr.net)

<sup>2</sup> аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, [ihfantkor@gmail.com](mailto:ihfantkor@gmail.com)

ход готовой продукции соответствующего качества. На основе метода численного моделирования проведено исследование влияния начальной температуры подаваемого для горения топлива воздуха в камеру «под огнем» на температурный режим процесса обжига углеродных изделий. Показано, что изменение начальной температуры воздуха существенно влияет на температурные поля печи. Выявлены закономерности изменения среднего значения перепада температур по заготовкам при различных режимах работы. Результаты исследования показали, что увеличение начальной температуры приводит к возможности уменьшения расхода природного газа, улучшает технико-экономические показатели процесса, однако вызывает увеличение перепадов температур в заготовках, которые обжигаются, что может привести к браку продукции. Из результатов данного исследования следует задача для дальнейших исследований – разработать алгоритм определения оптимальной начальной температуры воздуха с учетом как условий энергоэффективности процесса обжига, так и обеспечения требуемого качества готовой продукции.

**Ключевые слова:** численное моделирование, процесс обжига, температурные поля, начальная температура воздуха.

**O.A. Zhuchenko, A.P. Korotynskiy. The influence of the initial temperature of the air, fed into the chamber «under the fire», on the temperature mode of carbon products roasting.** Qualitative indicators of roasting products are fully determined from the technological mode parameters change in roasting carbon products campaign. Dividing the roasting campaign into the key stages and studying the dependence of the furnace temperature fields as a function of the technological parameters, and their rational use makes it possible to lower the defective products output. Therefore, it is important to model these processes taking into account the maximum number of factors that will minimize the time and cost of the finished products production; this modeling being an important stage in the development of a process control system that provides the output of finished products of the appropriate quality. On the basis of the numerical simulation method, the influence of the initial temperature of the air, which is fed for fuel combustion into the chamber «under the fire», on the temperature mode of products roasting has been carried out. It has been shown that the change in the initial air temperature substantially affects the furnace temperature fields. The regularities in the change of the mean value of the temperature drop across the blanks under different operating conditions were revealed. The main attention of the research was paid to the homogeneity of the temperature field of blanks, which significantly affects their quality. The results of the study showed that an increase in the initial temperature leads to the possibility of reducing the cost of natural gas, which improves the technical and economic parameters of the process, but causes an increase in temperature variations in the billets, which can lead to a defect of finished products. From the results of this study, the task for further research is to develop an algorithm for determining the optimal initial air temperature, taking into account both the energy efficiency conditions of the roasting process and the provision of the required quality of finished products.

**Keywords:** numerical simulation, roasting, temperature fields, initial air temperature.

**Постановка проблеми.** Широкого застосування у різних галузях промисловості знайшли вуглецеві вироби у вигляді графітованих електродів, ніпелів, вуглецевих блоків, анодів, тощо.

Одним із ключових етапів виробництва вуглеграфітових виробів, де вироби набувають механічної міцності, термостійкості, електро- та теплопровідності, є випалювання – термічна обробка при температурах 900-1300°C.

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

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відповідно до робіт [1-4] наведені теоретичні та експериментальні результати 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

печі на процес випалювання електродної продукції в багатокамерних печах випалювання.

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

**Постановка задачі.** Теоретична температура горіння зазвичай розраховується для продуктів повного горіння палива при умовах, коли все тепло від горіння палива, а також фізичне тепло підігріву палива та повітря, передається тільки продуктам горіння. Баланс тепла при цьому може бути виражений формулою [5]:

$$Q_n^p + c_n t_n + c_{нов} t_{нов} = V c_{заг} t_{заг},$$

де  $Q_n^p$  – теплотворна здатність палива;  $c_n$  – теплоємність палива;  $t_n$  – температура палива;  $c_{нов}$  – теплоємність повітря;  $t_{нов}$  – температура повітря;  $V$  – об'єм продуктів горіння;  $c_{заг}$  – теплоємність продуктів горіння,  $t_{заг}$  – температура продуктів горіння.

З наведеного вище випливає, що у результаті попереднього підігріву повітря ентальпія зростає, відповідно, температура продуктів горіння збільшується, що, у свою чергу, призводить до можливості зменшення затрати природного газу при забезпеченні потрібного температурного режиму.

Результати розрахунків залежності температури продуктів горіння у залежності від температури підігрітого повітря показані на рис. 1.

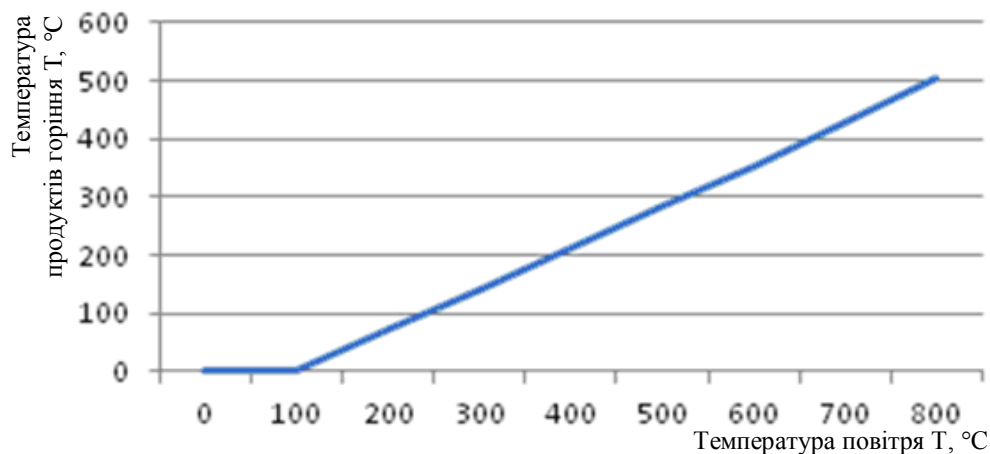


Рис. 1 – Графік залежності температури продуктів горіння від температури повітря

Підігрівання повітря, що йде на спалювання, до вищої температури за рахунок «внутрішніх ресурсів» без додаткових джерел енергії призводить до зменшення витрати природного газу, а, значить, до покращення техніко-економічних показників процесу випалювання.

З досвіду експлуатації багатокамерних печей випалювання відомо [6], що потрібне для спалювання газу повітря проходить попередньо через камеру, в якій знаходяться вже обпалені електродні заготовки. Таким чином, повітря для спалювання природного газу нагрівається і подається до камери, яка знаходиться «під вогнем» з температурою 250-350°C. Але одночасно це призводить до кількісних та якісних змін температурних полів заготовок і всієї камери в цілому.

Враховуючи, що однією з основних причин браку готової продукції є нерівномірність прогріву заготовок, що випалюються, дослідження впливу початкової температури повітря, що йде на подальше горіння, на температурні поля камери печі є важливою науковою задачею.

Таким чином, **метою даної статті** є дослідження впливу початкової температури повітря на температурний режим процесу випалювання вуглецевих виробів у камері «під вогнем».

**Виклад основного матеріалу. Опис умов дослідження.** Процес випалювання вуглецевих виробів відбувається у багатокамерній кільцевій закритій печі випалювання типу Riedhammer. Досягнення робочих температур відбувається за рахунок згорання природного палива та повітря. Дійсна витрата сухого повітря з урахуванням коефіцієнта витрати дорівнює [5]:

$$L_a = aL_0,$$

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  $a = 1,05-1,20$  [5].

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 [7].

У даному дослідженні розглядалася камера печі «під вогнем» із заготовками, завантаженими як показано на рис. 2. У дослідженні розглядається касета печі випалювання з розміром  $3,8 \times 0,76 \times 4,05$  м, у якій розміщено 5 заготовок діаметрами 700 мм та висотою 2100 мм.

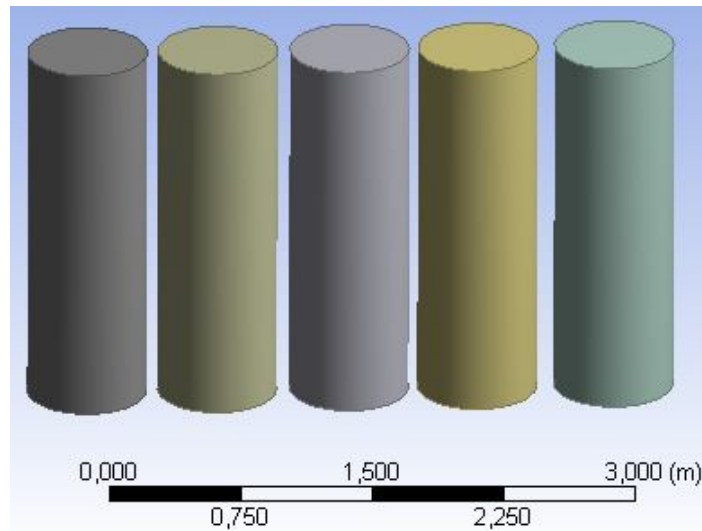


Рис. 2 – Схема завантаження заготовок у камеру «під вогнем»

Дослідження проводилось для двох значень початкових температур повітря 300 К та 500 К. Початкова температура природного газу, заготовок, пересипки та інших елементів печі – 300°К. Вміст у природному газі  $\text{CH}_4$  прийнято 96%, вміст кисню у повітрі – 24% [8-9]. Надлишок витрати повітря – 1.1. Тривалість процесу випалювання – 480 год.

**Результати дослідження.** Результати досліджень представлені на рис. 3-9. З представлених результатів видно, що у порівнянні з меншою початковою температурою повітря, максимальна температура по всьому об'ємі камери значно вища, що підтверджує результати розрахунків зміни температури продуктів горіння у залежності від температури підігрітого повітря.

В обох випадках спостерігається наявність холодної області печі (рис. 3). Прогрів камери у порівнянні з меншою початковою температурою повітря краще, що обумовлене більшим підводом теплоти.

Найвищою є температура стінок вогневого колодязя (близько 1530 К при початкових 300 К та близько 2254 К при початкових 500 К), мінімальною є температура протилежної стінки (близько 1380 К при початкових 300 К та близько 2063 К при початкових 500 К). Перепад температури по всьому об'ємі камери печі сягає 150 К та 191 К відповідно.

Як випливає з результатів моделювання, показаних на рис. 4, у температурному полі пересипки прослідковується наявність незначної холодної області.

При початковій температурі повітря 300 К максимальне значення температури досягає 1503 К, а мінімальне – 1443 К. Перепади температур по всьому об'ємі пересипки становлять близько 60 К.

При початковій температурі повітря 500 К максимальне значення температури – 2254 К, мінімальне – 2110 К. Перепад температур складає 144 К.

Спостерігається значний перепад температур по всьому об'ємі заготовок (рис. 5). Температура заготовок приймає значення 2206-2015 К при початковій температурі повітря 500 К, при початковій температурі повітря 300 К температура заготовок – 1443-1503 К. Відповідно, перепад температур складає 191 К та 60 К.

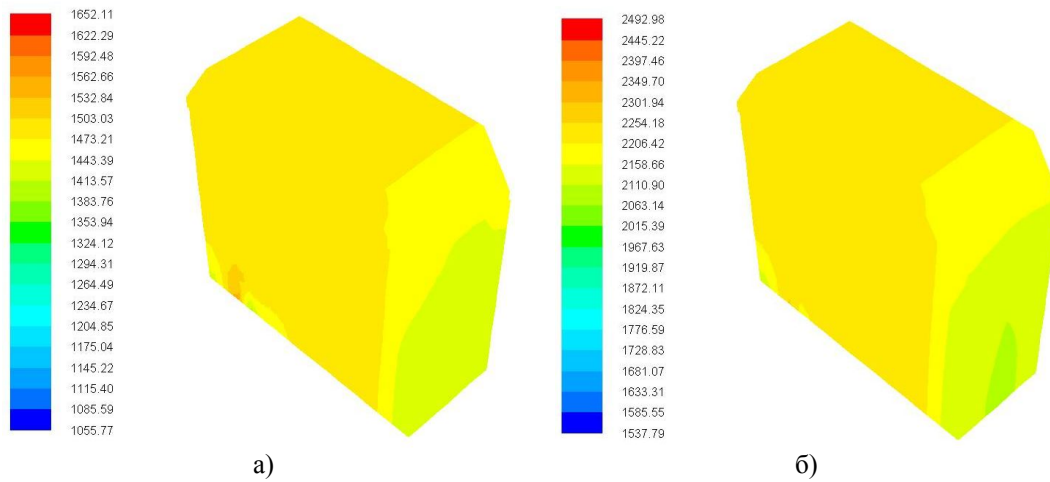


Рис. 3 – Температурне поле камери печі при початковій температурі повітря: а – 300 К, б – 500 К

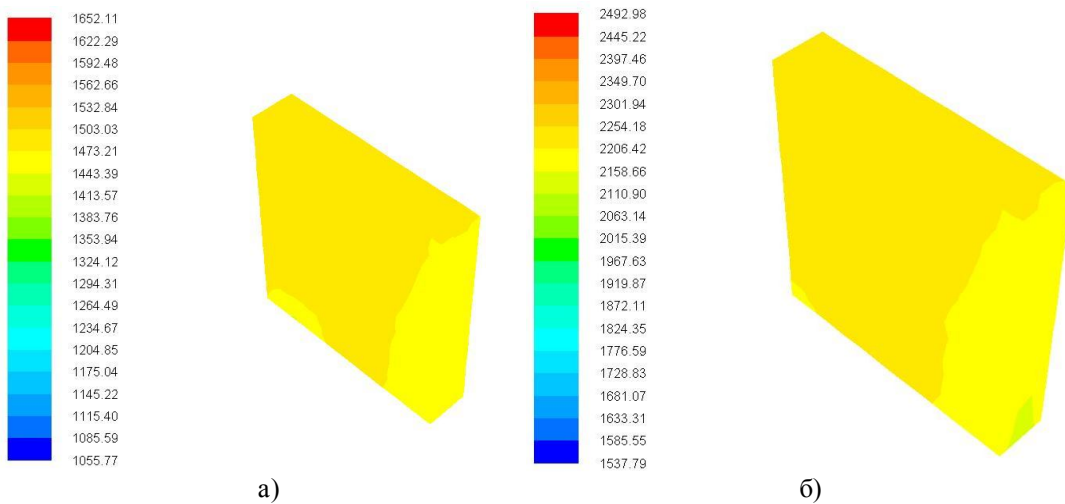


Рис. 4 – Температурне поле пересипки: при початковій температурі повітря: а – 300 К; б – 500 К

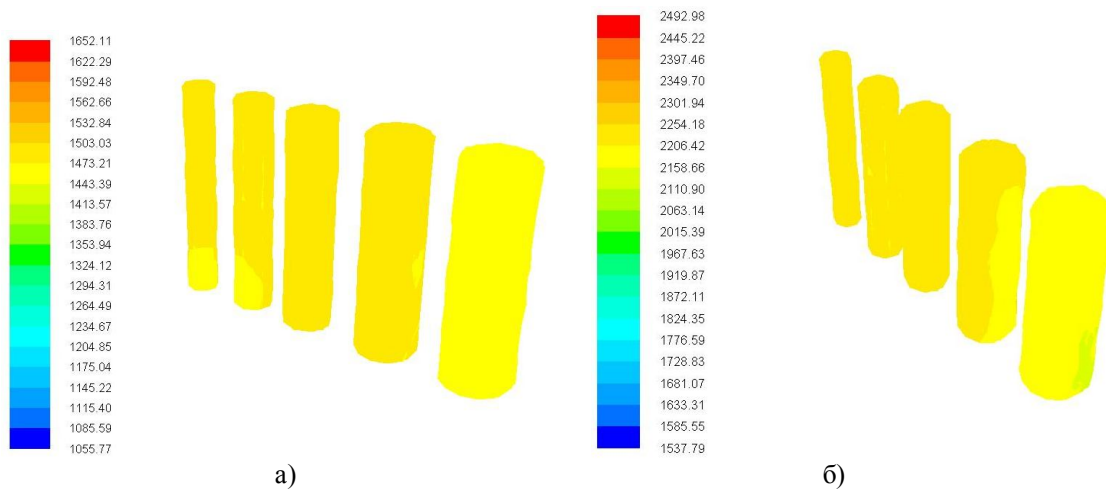


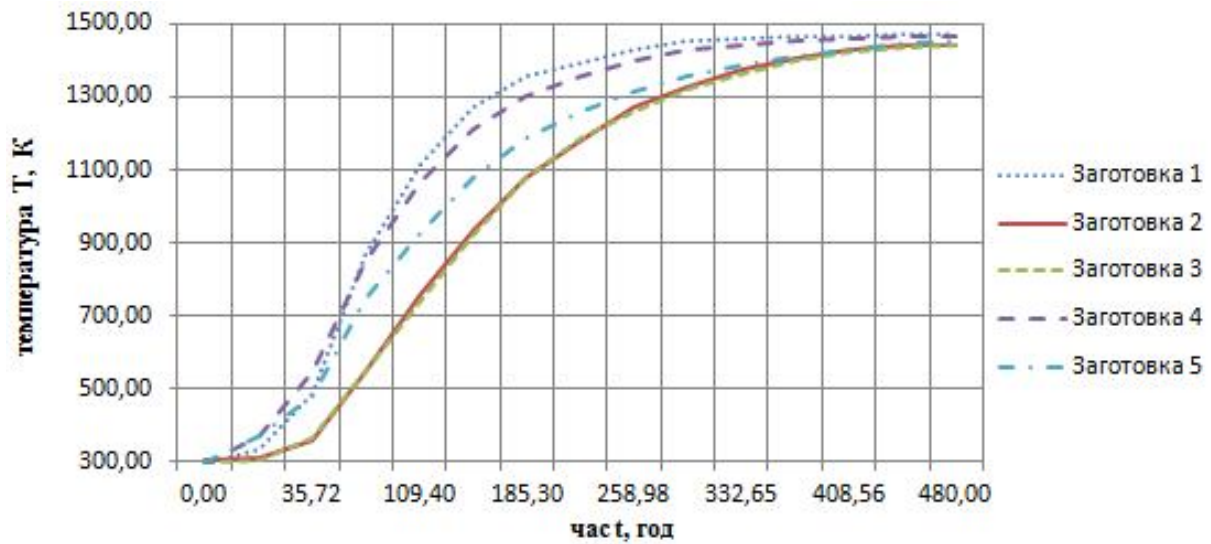
Рис. 5 – Температурні поля заготовок: при початковій температурі повітря: а – 300 К; б – 500 К

Графіки зміни мінімальної та максимальної температур в заготовках протягом всієї кампанії випалювання представлені на рис 6-7.

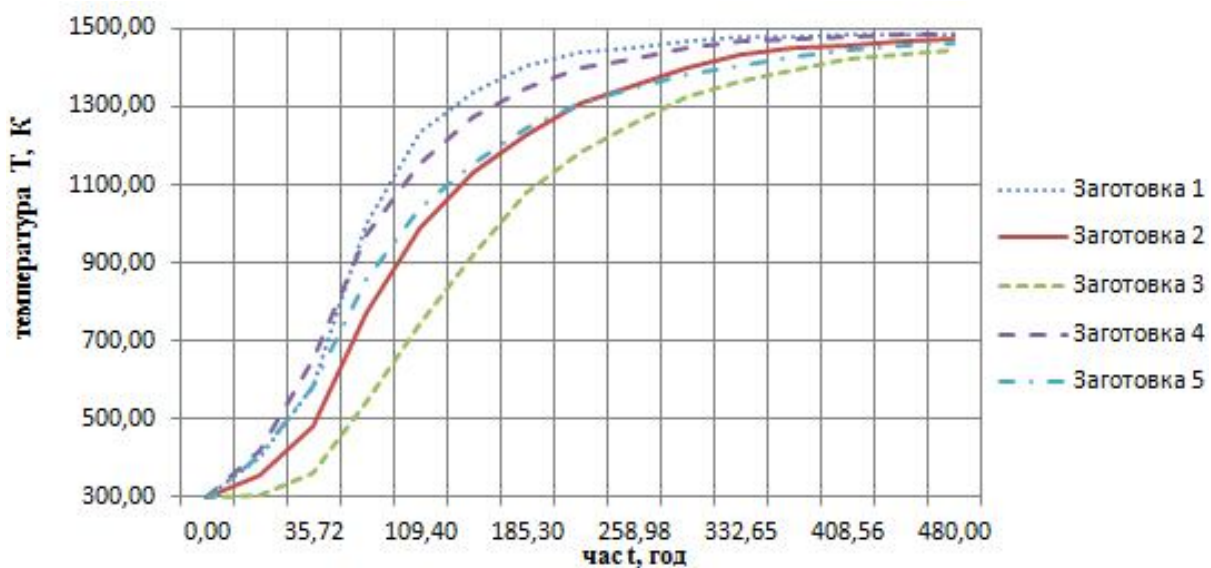
У зв'язку з дуже великим часом моделювання, а, відповідно, і повного прогріву камери печі, графіки мінімальних та максимальних температур в заготовках виходять майже на однакові температури.

З результатів моделювання випливає, що при початковій температурі повітря 300 К найдовше нагріваються заготовки 3 та 2. В заготовці 3 особливо повільно змінюється максимальна температура при меншій початковій температурі повітря, проте при початковій температурі повітря 500 К дана заготовка займає одне із перших місць за швидкістю зміни максимальної температури. Очевидно, це пояснюється особливістю руху димових газів по димовому тракту.

З результатів дослідження видно, що час виходу температур заготовок на усталений рівень при початковій температурі 300 К складає 350-400 год, при дотриманні аналогічних умов і початкової температури повітря 500 К час досягнення даних температур складає близько 120-190 годин.



а)



б)

Рис. 6 – Графік зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температури по заготовкам при початковій температурі повітря 300 К

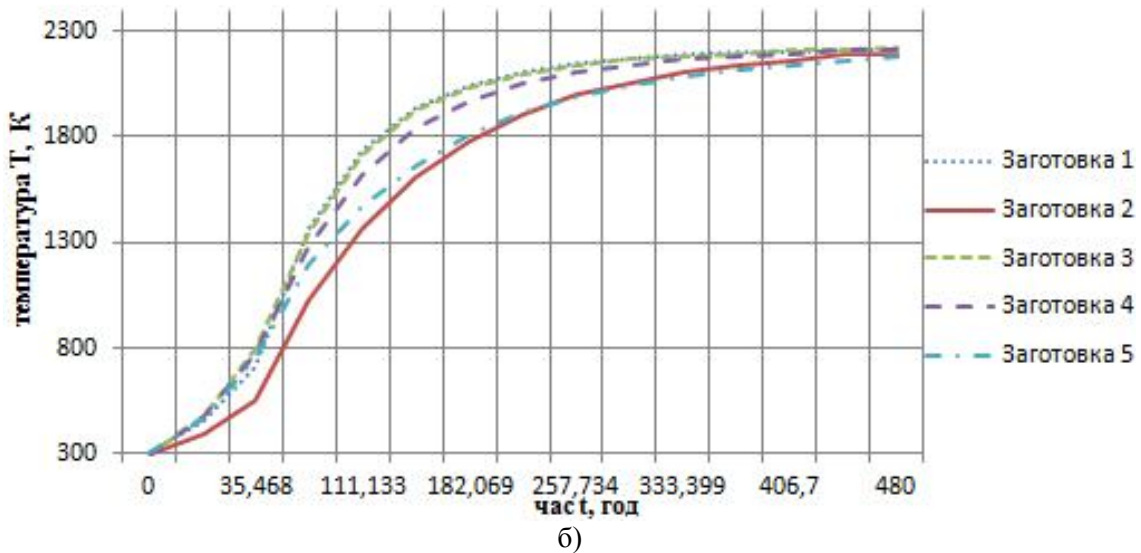
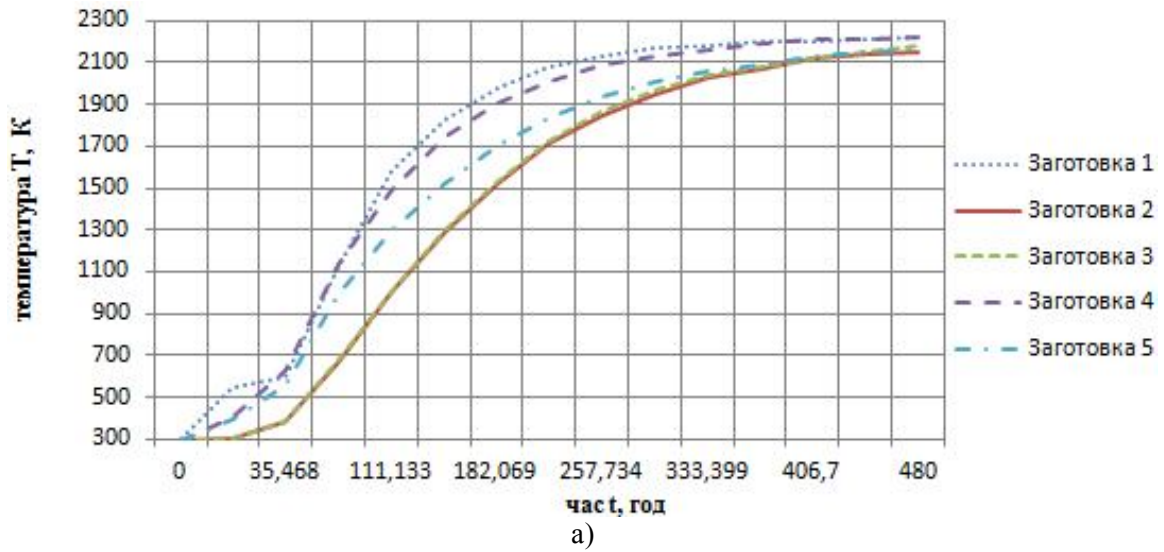


Рис. 7 – Графік зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температури по заготовкам при початковій температурі повітря 500 К

Графіки швидкості росту мінімальної та максимальної температури по газовому середовищі камери печі показані на рис. 8-9.

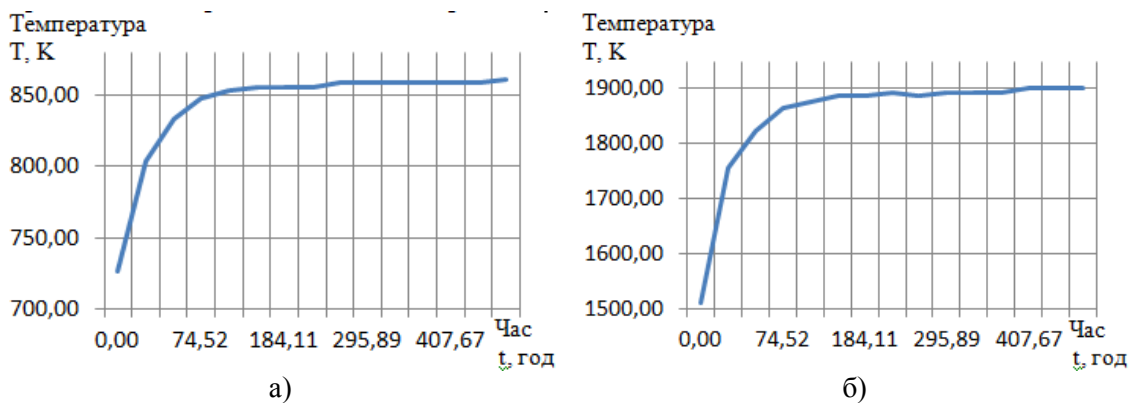


Рис. 8 – Графіки зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температури по газовому середовищі камери при початковій температурі повітря 300 К

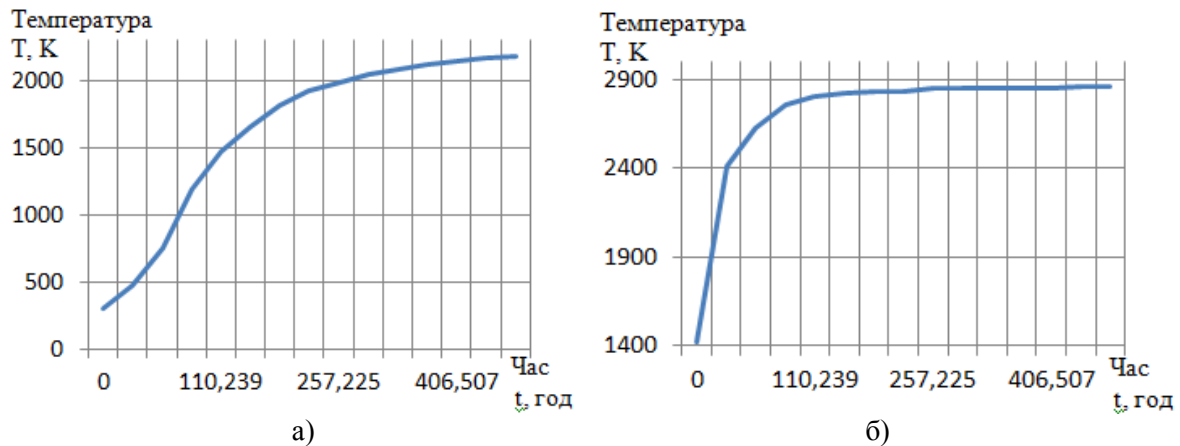


Рис. 9 – Графіки зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температури по газовому середовищі камери при початковій температурі повітря 500 К

Графіки зміни мінімальної та максимальної температури по газовому середовищі камери печі показані на рис. 8-9. З графіків видно, що мінімальна та максимальна температура стрімко змінюються у діапазоні 10-60 годин. Це можна пояснити тим, що саме у цей період часу 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.

Мінімальна та максимальна температура газового середовища камери стрімко змінюються у діапазоні 10-100 годин. Для прогріву стінок футеровки на більші температури, що в свою чергу буде догрівати природний газ та повітря, потрібно більше часу у порівнянні з газовим середовищем.

### Висновки

Проведено дослідження впливу початкової температури повітря, що подається для горіння палива у камеру «під вогнем», на температурний режим процесу випалювання вуглецевих виробів.

Показано, що зміна початкової температури повітря суттєво впливає на температурні поля процесу випалювання. Збільшення даної температури, з одного боку, призводить до можливості зменшення витрат природного газу, що покращує техніко-економічні показники процесу. Але, з іншого боку, викликає більші перепади температур у заготовках, які випалюються, що може призвести до браку готової продукції.

З результатів даного дослідження випливає задача для подальших досліджень – розробити алгоритм визначення оптимальної початкової температури повітря з урахуванням як умов енергоефективності процесу випалювання, так і забезпечення потрібної якості готової продукції.

### Перелік використаних джерел:

1. Совершенствование регламентов обжига с учетом динамики газовой выделения обжигаемых заготовок / А.Я. Карвацкий [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 6/5 (54). – С. 42-45.
2. Power saving at production of electrode products / Ye.N. Panov, S.V. Kutuzov, A.Ya. Karvatsky, I.L. Shilovich, G.N. Vasilchenko, T.B. Shilovich, S.V. Leleka, S.V. Danilenko, I.V. Pulinet, T.V. Chirka, T.V. Lazarev // XVII Intern. Conf. «Aluminium of Siberia», V Conference «Metallurgy of Non-Ferrous and Rare Metals», VII Symposium «Gold of Siberia»: Proceedings of the Intern. Congress (7-9 Sept. 2011; Krasnoyarsk). – Krasnoyarsk: Verso, 2011. – Pp. 412-423.
3. Расчетно-экспериментальное исследование процесса обжига углеграфитовых изделий в многокамерных печах / И.Л. Шилович [и др.] // Екологія. Людина. Суспільство: XIII міжнар. науково-практ. конф. студ., асп. та мол. вчених: зб. тез доп. / НТУУ «КПІ». – Київ, 2010. – С. 244-245.



4. Study on Anode Baking Parameters in Open-Top and Closed-Type Ring Furnaces / B. Baharvand, M.A. Siahouei, M.N. Batoei, S. Sadeghi // *Light Metals*. – 2013. – Pp. 1145-1150.
5. Левченко П.В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности / П.В. Левченко. – М. : Высшая школа, 1968. – 363 с.
6. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий / И.В. Пулинец, Е.Н. Панов, А.Я. Карвацкий, С.В. Лелека, Т.В. Лазарев, Т.В. Чирка. – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – 175 с.
7. Карвацкий А.Я. Математична модель тепло-гідродинамічного стану багатокамерної печі при випалюванні електродних заготовок / А.Я. Карвацький, І.В. Пулінець, І.Л. Шілович // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 1 (4). – С. 33-37.
8. Мамыкин П.С. Печи и сушила огнеупорных заводов / П.С. Мамыкин, П.В. Левченко, К.К. Стрелов. – Свердловск : Metallurgizdat, 1963. – 472 с.
9. Линчевский В.П. Топливо и его сжигание / В.П. Линчевский. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Metallurgizdat, 1959. – 400 с.

#### References:

1. Karvatskii A.Ia., Leleka S.V., Pulinets I.V., Lazarev T.V. Sovershenstvovanie reglamentov obzhiga s uchetom dinamiki gazovydeleniya obzhigaemykh zagotovo [Perfection of roasting regulations taking into account the dynamics of gas evolution of baked billets]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2011, no. 6/5 (54), pp. 42-45. (Rus.)
2. 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. Proceedings of XVII Intern. Conf. «Aluminium of Siberia», V Conf. «Metallurgy of Non-Ferrous and Rare Metals», VII Symposium «Gold of Siberia». Krasnoyarsk, 2011, pp. 412-423.
3. Shilovich I.L., Pulinets I.V. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie protsessa obzhiga uglegrafitovykh izdelii v mnogokamernykh pechakh. *Zb. tez dop. XIII Mizhn. nauk.-prakt. konf. stud., asp. ta mol. vchenikh «Ekologiya. Lyudina. Suspil'stvo»* [Calculation-experimental study of the process of calcination of carbon-graphite products in multi-chamber furnaces. Proceedings of XIII Int. Sci.-Pract. Conf. of students, graduate students and young scientists «Ecology. Human. Society»]. Kіiv, 2010, pp. 244-245. (Rus.)
4. Baharvand B., Siahouei M.A., Batoei M.N., Sadeghi S. Study on Anode Baking Parameters in Open-Top and Closed-Type Ring Furnaces. *Light Metal*, 2013, pp. 1145-1150.
5. Levchenko P.V. *Raschety pechei i sushil silikatnoi promyshlennosti* [Calculations of furnaces and dried silicate industry]. Moskva, Vysshiaia shkola Publ., 1968. 363 p. (Rus.)
6. Pulinets I.V., Panov E.N., Karvatskii A.Ia., Leleka S.V., Lazarev T.V., Chirka T.V. *Teploobmen v mnogokamernykh pechakh obzhiga uglegrafitovykh izdelii* [Heat transfer in multi-chamber roasters of carbon graphite products]. Kіiv, NTUU «KPI» Publ., 2014. 175 p. (Rus.)
7. Karvats'kii A.Ia., Shilovich I.L., Pulinets I.V. Matematichna model' teplo-gidrodinamichnogo stanu bagatokamernoї pechi pri vipaliuvanni elektrodnykh zagotovok [Mathematical model of heat-hydrodynamic state of a multi-chamber furnace at burning of electrode blanks]. *Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2012, no. 1 (4), pp. 33-37. (Ukr.)
8. Mamykin P.S., Levchenko P.V., Strellov K.K. *Pechi i sushila огнеупорных заводов* [Furnaces and dryers of refractory plants]. Sverdlovsk, Metallurgizdat Publ., 1963. 472 p. (Rus.)
9. Linchevskii, V.P. *Toplivo i ego szhiganie* [Fuel and its combustion]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1959. 400 p.

Рецензент: Є.М. Панов

д-р техн. наук, проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського

Стаття надійшла 15.03.2018