

Волощук В.А.

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

Жученко Л.К.

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

Коротинський А.П.

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

Сучасні світові тенденції розвитку чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інших галузей промисловості обумовлюють постійне нарощування обсягів виробництва графітованих вуглецевих виробів. Виробництво продукції такого класу є у значній мірі ресурсо- та енергозатратним. Саме тому підвищення ефективності даного виробництва є актуальною науково-практичним завданням особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв та їх дефіцитом. Ефективним методом розв'язання задачі енергозбереження у процесі випалювання є створення сучасної системи керування даним процесом. Єдиною альтернативою проведення дослідження процесу випалювання вуглецевих виробів є метод математичного моделювання. Визначальним технологічним режимом процесу випалювання є тепловий режим. Таким чином, для синтезу системи керування процесом випалювання потрібно дослідити особливості його теплових режимів з точки зору впливу на них різних технологічних змінних процесу.

У статті наведені результати дослідження температурних полів печі випалювання вуглецевих виробів. Основну увагу приділено впливу витрати палива та зміни типів завантажених заготовок на розподілення температур як у просторі печі випалювання, так і безпосередньо у заготовках різного діаметра. Показано, що піч випалювання можна умовно розділити на три температурні зони: гарячу, підсклепінчасту та холодну. Як продемонстрували результати дослідження, дані зони практично не змінюють свого розташування у різних режимах роботи. З'ясовано, що температура пересипки в околі заготовок практично не відрізняється від температури самих заготовок, що надає можливість контролювати температури заготовок на усіх етапах процесу випалювання. Найбільш цікавим з практичної точки зору є результати дослідження температурних полів безпосередньо у заготовках. Тут слід звернути увагу на значний перепад температур заготовок у горизонтальному напрямку та суттєвий вплив гарячих зон печі на температури в заготовках.

Отримані результати мають бути використані для побудови системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів. Розроблення такої системи і є предметом подальших досліджень.

Ключові слова: випалювання, вуглецеві заготовки, температурні поля, перепади температур, дослідження температур.

Постановка проблеми. У економіці України виробництво вуглецевих виробів відіграє важливу роль, оскільки продукція даного виробництва широко використовується в різних визначальних для країни галузях промисловості, технологічні процеси яких нерозривно пов'язані з необхідністю використання електротермічних процесів. Зокрема, до таких виробництв відносяться підприємства чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інші.

Сучасні світові тенденції розвитку чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інших галузей промисловості обумовлюють постійне нарощування обсягів виробництва графітованих вуглецевих виробів. Графіт широко використовується як футеровочний матеріал в доменних та феросплавних печах, атомній промисловості, є незамінним в електротермії. Значним споживачем графітованих виробів є алюмінієве виробництво.

Виробництво вуглецевих виробів є у значній мірі ресурсо- та енергозатратним. Саме тому підвищення ефективності даного виробництва є актуальною науково-практичним завданням особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв.

Одним з основних технологічних процесів у виробництві вуглецевих виробів є процес випалювання вуглецевих заготовок. Даний процес характеризується значною енергоємністю, у зв'язку з чим задача енергозбереження у процесі випалювання є актуальною науково – технічною задачею.

Ефективним методом розв'язання задачі енергозбереження у процесі випалювання є створення сучасної системи керування даним процесом. Побудові системі керування має передувати дослідження процесу випалювання як об'єкту автоматичного керування. Проведення такого дослідження безпосередньо на промисловому обладнанні практично не можливе з ряду причин. По-перше, дослідження передбачає реалізацію різних режимів роботи, що може призвести у кращому випадку до браку продукції, а у гіршому – до аварійної ситуації, що не припустимо. Це означає, що є суттєві обмеження на кількість режимів роботи, які можуть бути реалізовані на практиці, що у значній мірі звужує область дослідження. По – друге, реалізація різних технологічних режимів гарантує виникнення економічних витрат, обумовлених неоптимальністю даних режимів.

У зв'язку з викладеними обставинами єдиною альтернативою проведення дослідження процесу випалювання вуглецевих виробів є метод математичного моделювання. Визначальним технологічним режимом процесу випалювання є тепловий режим [1–4]. Таким чином, для синтезу системи керування процесом випалювання потрібно дослідити особливості його теплових режимів з точки зору впливу на них різних технологічних змінних процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Із сучасних досліджень теплових режимів процесу випалювання слід виділити роботи Панова Є. М., Карвацького А. Я., Пулинця І. В., Шабалова С. М., Малахова С. О., Коротинського А. П. [1–5].

У роботі [3] основну увагу приділено практичному застосуванню нових наукових результатів. Зокрема, розроблений раціональний режим випалювання вуглеграфітових заготовок, сформульовані пропозиції щодо раціонального розміщення вуглеграфітових заготовок, виконаний аналіз впливу похибок керування теплового режиму печі

випалювання на швидкість та рівномірність нагрівання вуглеграфітових заготовок.

У дослідженні [4] на основі експериментальних та теоретичних досліджень розроблена математична модель фізико – хімічних і теплових процесів випалювання вуглеграфітової продукції. Розроблена методика розрахунку, що дозволяє визначити температуру у вуглеграфітових заготовках для різних режимів випалювання з урахуванням конструктивних особливостей печей. Теоретично обґрунтована можливість створення імпульсної системи згоряння палива для кільцевих печей випалювання при використанні природного газу низького тиску.

З точки зору використання результатів дослідження теплових режимів процесу випалювання вуглецевих виробів для створення системи керування даним процесом найбільш цікавими є результати, отримані у дослідженні [5]. У даній роботі проаналізовано вплив на перебіг процесу змінних, які можуть бути використані для керування процесом випалювання. Основну увагу приділено впливу даних змінних на якість продукції. У результаті проведених досліджень встановлено, що найбільш ефективною керуючою дією є витрати палива на стадії камера «під вогнем».

Формулювання цілей статті. Як показали результати дослідження [5] фактично єдиною ефективною керуючою дією тепловими режимами процесу випалювання вуглецевих виробів є витрати палива у камері «під вогнем». У зв'язку з цим у подальших дослідженнях є сенс розглянути саме цю камеру.

Дослідження теплових режимів камери «під вогнем» має на меті створення системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів, яка б забезпечувала потрібні якісні показники продукції у режимі енергозбереження.

До головних питань щодо якості продукції на стадії випалювання віднесемо: 1) усі заготовки повинні бути доведені до потрібного температурного режиму і витримані необхідний час; 2) перепад температур у повздовжувальному напрямку заготовки не повинен перевищувати допустимий рівень для запобігання виникнення тріщин.

У зв'язку з наведеними вище обставинами, **метою даної статті** є дослідження процесу випалювання вуглецевих виробів для формування відповідей на наступні запитання щодо теплових режимів камери «під вогнем»:

1) де знаходиться область з найвищою та найнижчою температурами, чи мігрують ці області у залежності від завантаження та зміни витрати палива;

2) де знаходиться область з максимальним перепадом температур у повздовжньому напрямку заготовки, чи мігрує ця область;

3) чи суттєво відрізняється температура заготовки від температури пересипки біля неї.

Для дослідження теплових режимів камери «під вогнем» методом математичного моделювання використовується модель, наведена у [1].

Об'єктом дослідження є камера «під вогнем», в яку по чергово завантажені 5 заготовок діаметрами 300 мм та 600 мм.

Прийнято, що початкова температура всіх елементів печі складає 773 К, температура повітря та природного газу – 600 К, швидкість подачі повітря та природного газу – 3 м/с та 1 м/с відповідно, вміст кисню 24%, вміст СН₄-94%. Тривалість дослідження – 100 годин.

Всі результати проведених досліджень представлені на момент завершення кампанії випалювання вуглецевих виробів. Загальний вигляд температурних полів печі випалювання показані на рис. 1. Отримані результати свідчать, що характер температурних полів касети печі фактично не змінюється при зміні розміру заготовок, що обробляються. Різниця полягає тільки в абсолютних значеннях температур. Так максимальне значення температури при випалюванні заготовок діаметром 300 мм становить 2494 К, а при 600 мм – 2490 К, мінімальне значення температури – відповідно 754 К та 708 К. Максимальний перепад температур по касеті складає відповідно 1740 та 1782 К, що говорить про краще прогрівання касети з заготовками діаметром 300 мм.

З результатів моделювання видно характерні гарячі зони касети печі, а саме підсклепінчаста зона, де акумулюється значна кількість димових газів, зона першої та п'ятої заготовки, що обумовлено особливістю руху димових газів. Результати даного дослідження свідчать про те, що розмір заготовок не впливає на міграцію характерних зон касети.

Аналіз температурних полів касети печі в перерізі (рис. 2) говорить про значний перепад температур у пересипці зверху вниз, та менш значний перепад зліва направо. Максимальна температура пересипки становить 2085 К та 2075 К, а мінімальна – 1106 К та 1077 К для завантаження 300 мм та 600 мм відповідно. Перепад температур таким чином 979 К та 998 К.

Перепад температур у пересипці по вертикалі обумовлений рухом димових газів через димові канали з підсклепінчастої зони.

Найбільш цікавим з практичної точки зору є результати дослідження температурних полів безпосередньо у заготовках (рис. 3). Тут слід звернути увагу на дві обставини: 1) значний перепад температур заготовок у горизонтальному напрямку; 2) суттєвий вплив гарячих зон печі на температури в заготовках.

Вплив витрати палива на температурні поля камери «під вогнем»

Як вказувалось вище, основною керуючою дією процесу випалювання вуглецевих виробів є витрата палива у камері «під вогнем». У зв'язку з цим проведемо нове дослідження з тим самим об'єктом і початковими умовами, зменшивши тільки швидкість подачі палива на 0,95 м/с і відповідно швидкість подачі повітря на 2,85 м/с.

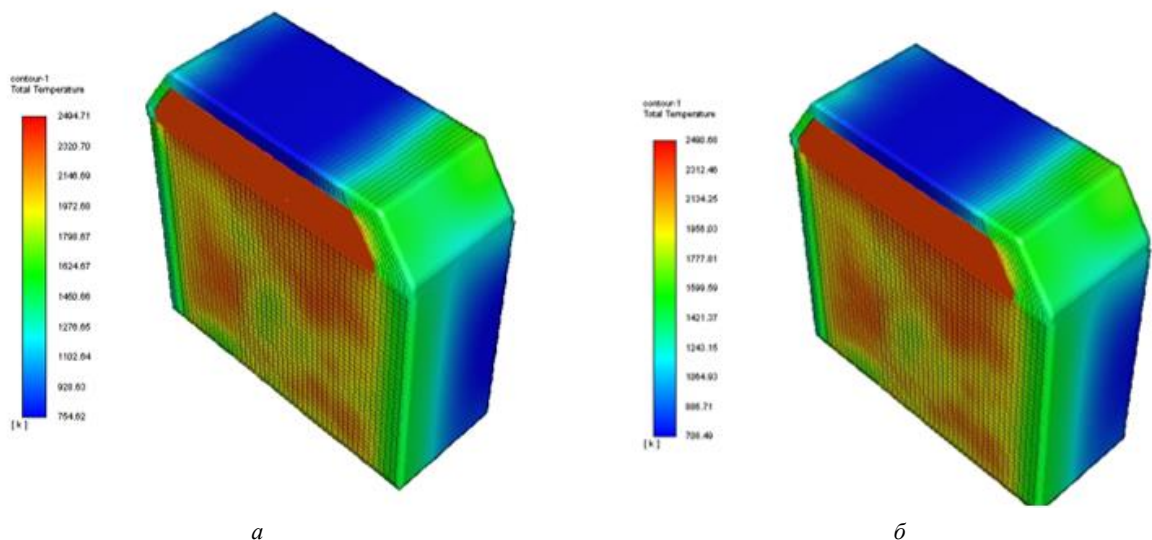


Рис. 1. Температурне поле касети печі випалювання: а) із заготовками 300 мм; б) із заготовками 600 мм

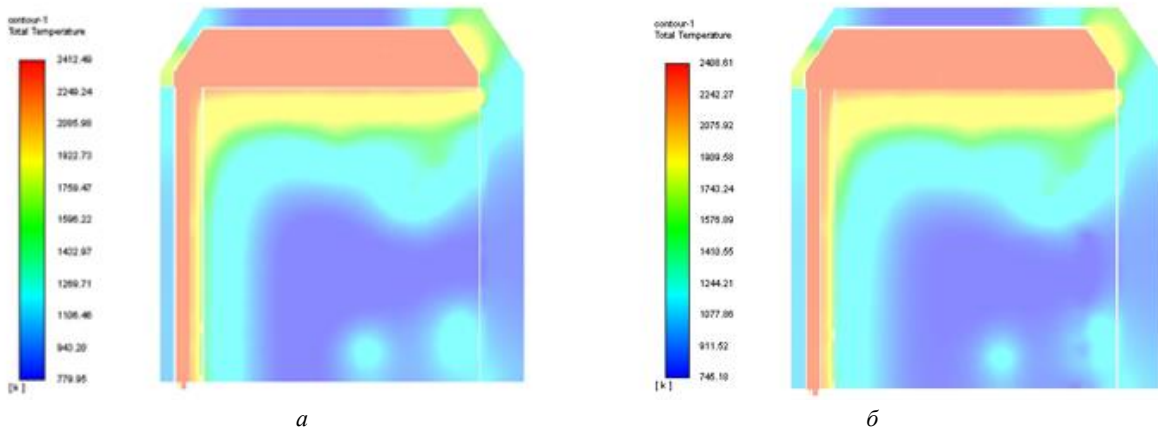


Рис. 2. Температурне поле касети печі в перерізі:
а) із заготовками 300 мм; б) із заготовками 600 мм

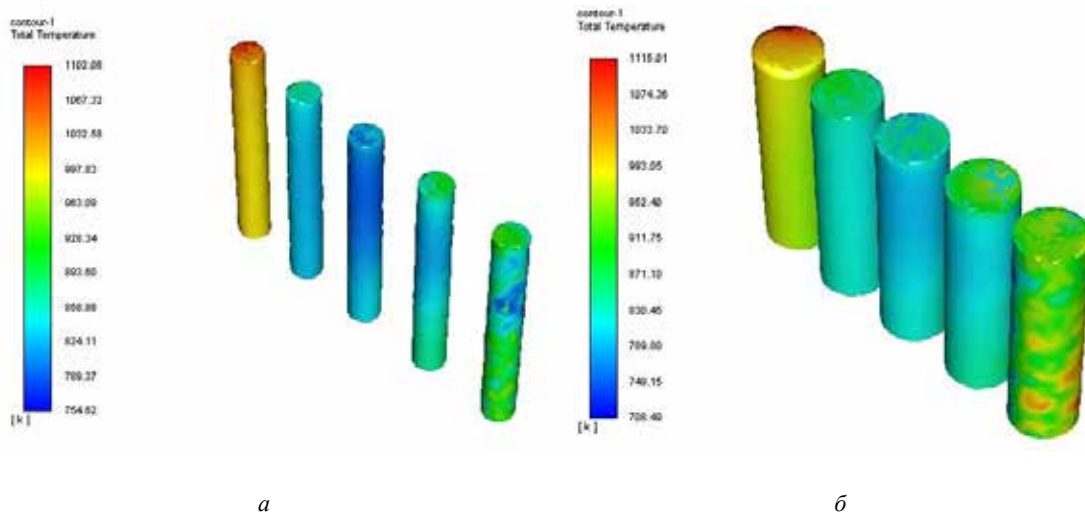


Рис. 3. Температурне поле заготовок наприкінці дослідження

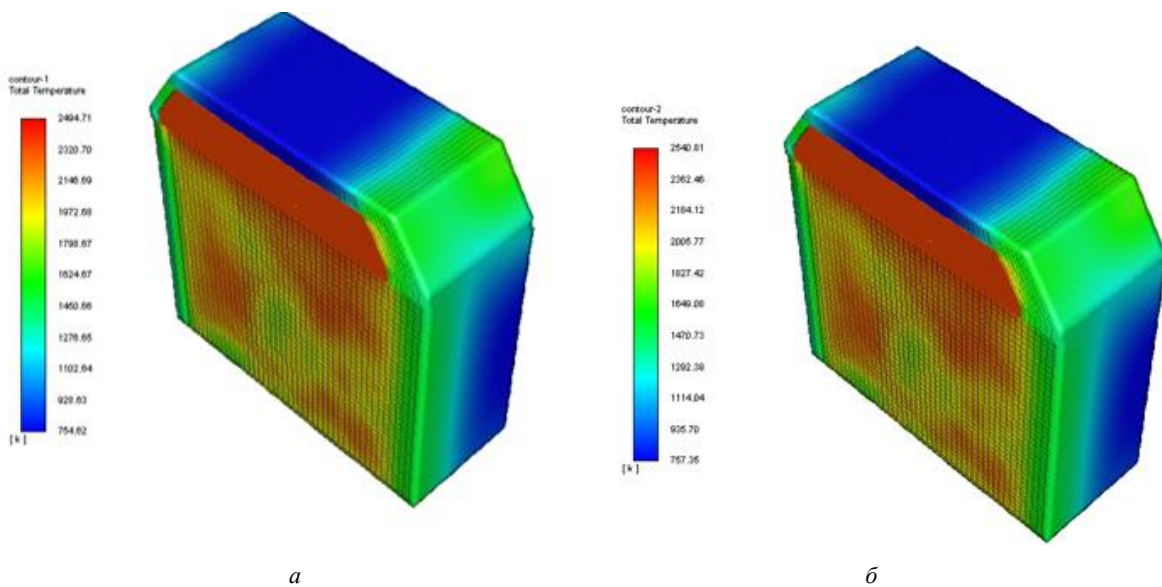


Рис. 4. Температурне поле касети печі випалювання:
а) із заготовками 300 мм; б) із заготовками 600 мм

Результати моделювання температурних полів касети печі наприкінці кампанії випалювання вуглецевих виробів представлені на рис. 4. З отриманих результатів видно, що характер температурних полів при зміні витрати палива фактично не змінився. Змінилися тільки абсолютні значення температур. Максимальне значення температури при випалюванні заготовок діаметром 300мм становить 2494 К та 2540 К для заготовок діаметром 600мм; мінімальні значення температур – відповідно 754 К та 757 К. Максимальний перепад по касеті – відповідно 1740 К та 1783 К.

Характерні зони касети печі практично не змінили свого розташування, що дозволяє зробити висновок про відсутність їх міграції при зміні витрати палива. Розташування характерних зон показано на рис. 5.

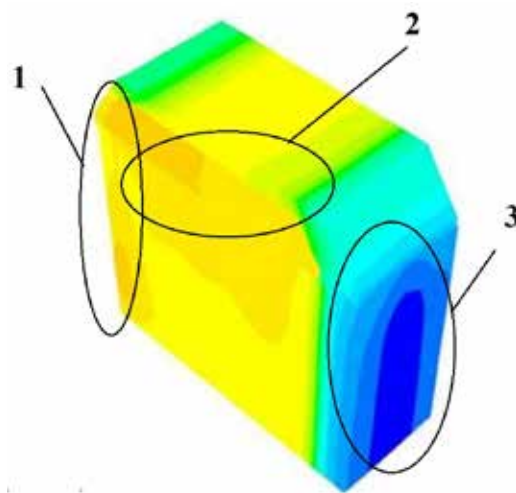


Рис. 5. Характерні температурні зони печі випалювання

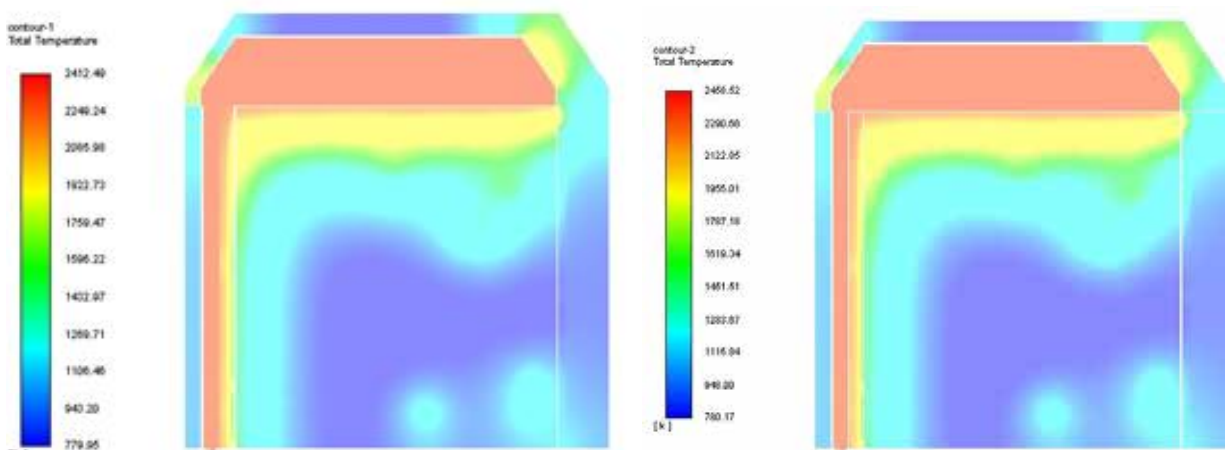


Рис. 6. Температурне поле касети печі в перерізі

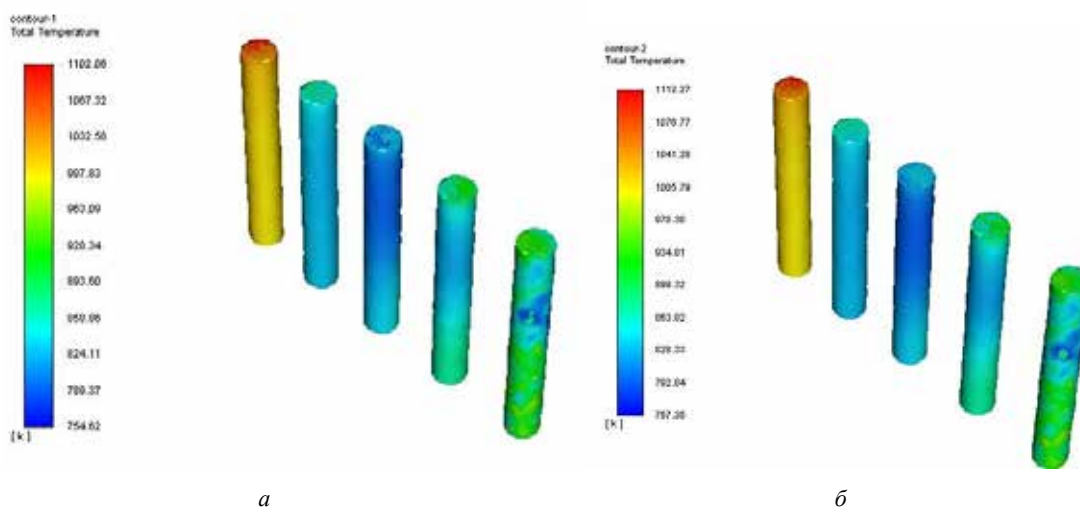


Рис. 7. Температурне поле заготовок наприкінці дослідження: а) із заготовками 300 мм; б) із заготовками 600 мм

Зона 1 – «гаряча зона» печі – зона, де температура досягає максимуму. Наявність цієї зони обумовлена розташуванням тут газового каналу, де відбувається горіння. Зона 2 – «підсклепінчаста зона» печі розташована під склепінням печі, де завжди знаходиться велика кількість гарячих димових газів. Зона 3 – «холодна зона» печі.

Характер розподілення температури по пересипці зображено на рис 6, де наведено температурне поле касети печі в перерізі. З рис. 6 видно, що так само, як і у попередньому дослідженні, прослідковується значний перепад температур зверху вниз, та менш значний перепад зліва направо. Максимальна температура складає 2085 та 2122 К, мінімальна – 1106 та 1115 К при випалюванні заготовок 300 мм та 600 мм відповідно. Перепад температур становить 979 та 1007 К.

Як свідчать результати моделювання розподілення температур безпосередньо у заготовках, представлені на рис. 7, найбільш нагрітою заготовкою залишається заготовка, найближча до «гарячої зони» печі, заготовка з найменшою температурою – заготовка біля «холодної зони».

Висновки

Результати проведеного дослідження свідчать про те, що зміна витрати палива суттєво впливає на розподілення температур і перепадів темпера-

тур в усьому просторі печі випалювання, у тому числі безпосередньо у заготовках. Найбільші зміни температур при зміні витрати палива відбуваються у «гарячій зоні» печі, а значить, і у заготовках, які розташовані у цій зоні. Це вимагає особливої уваги до цієї зони з метою запобігання випуску бракованої продукції.

За результатами дослідження піч випалювання з точки зору розподілення температур можна поділити на 3 зони: «гарячу», «підсклепінчасту» та «холодну». Ці зони не змінюють свого розташування при зміні витрати палива та при завантаженні печі заготовками різних діаметрів.

Заготовки, розташовані у «холодній зоні» печі мають найнижчу температуру на протязі всього процесу випалювання. Тому саме на ці заготовки треба орієнтуватися при визначенні тривалості процесу випалювання.

Як показали результати дослідження, температура пересипки в околі заготовок практично не відрізняється від температури самих заготовок, що дозволяє здійснювати контроль температури останніх.

Отримані результати мають бути використані для побудови системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів. Розроблення такої системи і є предметом подальших досліджень.

Список літератури:

1. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеродистых изделий : монография / И.В. Пулинец [и др.] ; Мин-во образования и науки Украины, НТУУ «КПИ». Киев : НТУУ «КПИ», 2014. 175 с.
2. Карвацький А. Я. Теплоелектричний та механічний стан високотемпературних енергоємних промислових агрегатів : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.05.13 «Машини та апарати хімічних виробництв» / А. Я. Карвацький. К., 2010. 40 с.
3. Шибалов С. Н. Совершенствование тепловых процессов с целью повышения качества обжига заготовок из углеродистых материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / С. Н. Шибалов. М., 2004. 30 с.
4. Малахов С. А. Совершенствование технологии обжига углеродистой продукции в многокамерных печах обжига закрытого типа : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / С. А. Малахов. Владикавказ, 2004. 30 с.
5. Коротинський А.П. Автоматизація процесу керування багатоканальними печами випалювання вуглецевих виробів : дис. ... докт. філософії : 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / А. П. Коротинський. К., 2020. 190 с.

Voloshchuk V.A., Zhuchenko L.K., Korotynskiy A.P. RESEARCH OF THERMAL REGIMES OF THE PROCESS OF BURNING OF CARBON PRODUCTS

Modern world trends in the development of ferrous and nonferrous metallurgy, mechanical engineering, chemical industry and other industries cause a constant increase in the production of graphitized carbon products. The production of products of this class is resource- and energy-consuming to a large extent. That is why increasing the efficiency of this production is an urgent scientific and practical task, especially in modern conditions of constant growth in the cost of energy carriers and their shortage. An effective method of solving the problem of energy saving in the firing process is the creation of a modern control system for this process. The only alternative to researching the process of burning carbon products is the method of mathematical modeling. The defining technological mode of the firing process is the thermal mode. Thus, for the synthesis of the control system of the firing process, it is necessary to investigate the peculiarities of its thermal regimes

from the point of view of the impact on them of various technological variables of the process. The article presents the results of the study of the temperature fields of the furnace for burning carbon products. The main attention is paid to the influence of fuel consumption and changes in the types of loaded workpieces on the temperature distribution both in the space of the kiln and directly in the workpieces of different diameters. It is shown that the firing furnace can be divided into three temperature zones: hot, sub-vault and cold. As the results of the study showed, these zones practically do not change their location in different modes of operation. It was found that the pouring temperature in the vicinity of the workpieces does not differ from the temperature of the workpieces themselves, which makes it possible to control the temperature of the workpieces at all stages of the burning process. The most interesting from a practical point of view are the results of the study of temperature fields directly in the workpieces. Here, attention should be paid to the significant temperature difference of the workpieces in the horizontal direction and the significant influence of the hot zones of the furnace on the temperatures in the workpieces.

The obtained results should be used to build a control system for the firing of carbon products. The development of such a system is the subject of further research.

Key words: *firing, carbon blanks, temperature fields, temperature differences.*