

УДК 621.783.24

М. В. Михайловський¹, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0002-9960-6189

О. В. Гупало¹, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0003-3145-9220

О. П. Єгоров¹, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0002-9867-0437

В. І. Шибакінський¹, к.т.н., доцент, ORCID 0009-0003-4387-8315

¹ *Український державний університет науки і технологій*

РОЗРОБКА АСК РЕЖИМОМ ДУТТЯ КІЛЬЦЕВОЇ ПЕЧІ ПРИ ЙОГО ЗБАГАЧЕННІ ТЕХНОЛОГІЧНИМ КИСНЕМ

Анотація. Перспективними заходами підвищення енергоефективності кільцевих печей є збільшення температури підігріву повітря шляхом їх переведення на регенеративну систему опалення та утилізації теплоти димових газів і збагачення повітря горіння технологічним киснем. Застосування регенеративних пальникових пристроїв потребує значних інвестицій. В той же час, при наявності надлишків технологічного кисню і обмеженій інвестиційній можливості підприємства доцільним є реалізація технології нагрівання металу при збагаченому киснем повітрі. Досліджено теплову роботу кільцевої печі трубопрокатного цеху № 4 ПАТ «Інтерпайп НТЗ», яка працює на атмосферному та збагаченому киснем повітрі. Розглянуто два варіанти організації змішування технологічного кисню з атмосферним повітрям: 1) після підігріву атмосферного повітря в рекуператорі; 2) перед рекуператором з наступним підігрівом в рекуператорі суміші атмосферного повітря та технологічного кисню. Для впровадження заходу розроблено температурний режим роботи печі на збагаченому киснем повітрі. На основі аналізу техніко-економічної ситуації на підприємстві рекомендовано здійснити варіант змішування підігрітого атмосферного повітря з технологічним киснем після рекуператора. Опрацьовано алгоритм керування таким комбінованим дуттям кільцевої печі. З урахуванням вимог технічного завдання розроблено відповідну систему керування з використанням мікропроцесорного обчислювального комплексу. За результатами комп'ютерного моделювання керування співвідношенням «газ-повітря-кисень» вибрані закони регулювання і визначені налаштування регуляторів витрати палива, підігрітого повітря і технологічного кисню, що забезпечують заданий тепловий режим нагрівальної кільцевої печі. Визначено, що з використанням в кільцевій печі наявного ресурсу технологічного кисню 2000 м³/год можливо збільшити концентрацію кисню у повітрі дуття до 33,6 %. Це забезпечує підвищення енергоефективності печі та економію палива до 18 %. Річний економічний ефект від впровадження заходу складе майже 10 млн. грн. Результати роботи можуть бути базою для створення автоматизованої системи керування (АСК) комбінованим дуттям кільцевої печі.

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Ключові слова: кільцева піч, режим дуття, автоматизована система керування, технологічний кисень, комп'ютерне моделювання.

Посилання для цитування: Михайловський М. В., Гупало О. В., Сгоров О. П., Шибакінський В. І. Розробка АСК режимом дуття кільцевої печі при його збагаченні технологічним киснем. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 741-752. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-741-752>

Вступ. Кільцева піч є автоматизованим агрегатом, що забезпечує рівномірне нагрівання металу до заданої температури. Для автоматичного регулювання ця піч є статичним об'єктом з великою інерційністю за каналами збурювань і керування. Режим роботи печі характеризується такими вихідними параметрами: температурою робочого простору в опалювальних зонах печі; співвідношенням «газ-повітря» в зонах; тиском в робочому просторі печі.

При роботі системи автоматичного керування діє низка збурюючих впливів: зміна продуктивності печі, зміна тяги, збурювання, пов'язані із завантаженням і вивантаженням заготовок, зміна тиску газу й повітря, що подаються в пальникові пристрої, їх нерівномірний розподіл по окремих пальниках і зонах печі, взаємний вплив зон, зміна калорійності палива. Основними керуючими впливами є температура в зонах печі, витрати палива та повітря на зони нагрівання, швидкість руху металу в робочому просторі печі та величина тяги в димоході.

Відповідно до результатів досліджень [1], одним з найбільш перспективних заходів підвищення енергоефективності кільцевих печей є збільшення температури підігріву повітря шляхом переведення кільцевої печі на регенеративну систему опалення і утилізації теплоти димових газів та збагачення повітря горіння технологічним киснем. Застосування регенеративних пальникових пристроїв потребує значних інвестицій. В той же час, при наявності надлишків технологічного кисню і обмеженій інвестиційній спроможності підприємства, доцільним є реалізація технології нагрівання металу при збагаченому киснем повітрі.

Метою даного дослідження є вибір найбільш раціонального варіанту підвищення енергоефективності кільцевої печі та економії природного газу при збагаченні повітря технологічним киснем.

Для реалізації технічної пропозиції щодо модернізації системи подачі повітря до пальникових пристроїв печі за рахунок збагачення повітря горіння технологічним киснем необхідно розробити АСК тепловим режимом кільцевої печі з використанням сучасних технічних засобів автоматизації.

Вихідні дані та результати дослідження. Кільцеву піч призначено для нагрівання циліндричних заготовок перед прошивним пресом. Робочий простір печі розділено на чотири технологічні зони: три опалювальні (перша і друга зварювальні та томильна) зони та одну неопалювальну – методичну зону. По відношенню до активної площі поду ($L_{\text{заг}} = 70,65$ м) технологічні зони печі складають: методична – 30 %, перша зварювальна – 27 %; друга зварювальна – 23 %; томильна – 20 %. Температура підігріву повітря в рекуператорах 250 – 300 °С. Температурний режим печі наведено у технологічній інструкції [2].

Основні розміри робочого простору печі: середній діаметр – 24 м; ширина поду – 4,90 м; висота робочого простору – 2,04 м. Піч опалюється природним газом за допомогою 55 пальників. Для підігріву повітря горіння до 300 °С піч обладнано металевим рекуператором з площею поверхні теплообміну 200 м².

Дослідження виконано для роботи печі з максимальною продуктивністю 60 т/год при нагріванні заготовок діаметром 570 мм до кінцевої температури поверхні 1280 °С з перепадом температур за товщиною заготовки 30 °С.

За допомогою методики розрахунку [3], побудованої на основі використання методу теплової діаграми, досліджено теплову роботу печі при використанні для спалювання палива атмосферного повітря. Отримані результати у вигляді температурної і теплової діаграм нагрівання заготовок приведено на рисунках 1 і 2, відповідно.

З цих рисунків видно, що при максимальній продуктивності піч працює за двохзонним температурним режимом. Тривалість нагрівання металу до заданих параметрів складає 6,3 години.

При виконанні досліджень розглянуто два варіанти. Варіант 1 передбачає, що підігріте в рекуператорі атмосферне повітря змішується з холодним киснем перед піччю. Згідно з варіантом 2 змішування атмосферного повітря з киснем здійснюється перед рекуператором. Максимальна витрата кисню в обох варіантах дорівнює 2000 м³/год.

Проведено дослідження впливу концентрації кисню у повітрі горіння (у діапазоні від 25 % до 37 %) на такі характеристики теплового режиму роботи печі: температуру підігріву повітря в рекуператорі і температуру повітря горіння (рисунок 3), коефіцієнт використання теплоти палива і питому витрату палива (рисунок 4). Варіант 1 показано суцільними, а варіант 2 – пунктирними лініями.

Визначено, що економія питомої витрати палива у варіанті 1 становить 6,95 м³/т, а у варіанті 2 – 7,24 м³/т.

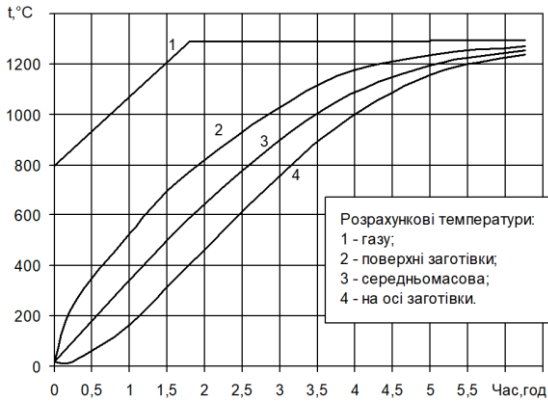


Рисунок 1 – Температурна діаграма нагрівання заготівки в кільцевій печі при роботі на атмосферному повітрі

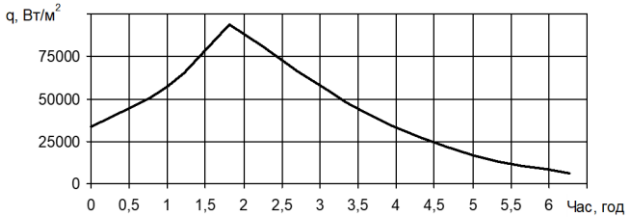


Рисунок 2 – Теплова діаграма нагрівання заготівки в кільцевій печі при роботі на атмосферному повітрі

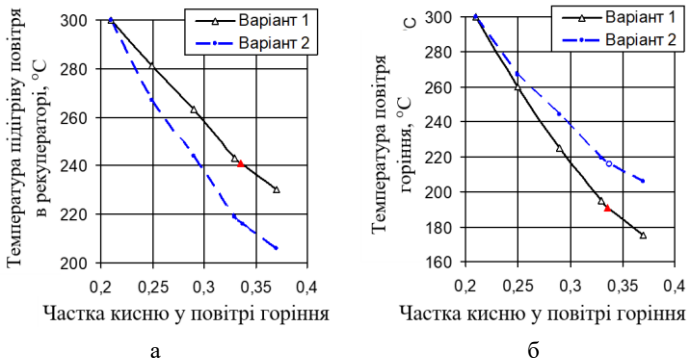


Рисунок 3 – Зміна температур продуктів згоряння на виході з печі (а) та підігріву повітря в рекуператорі (б) при збагаченні повітря горіння киснем

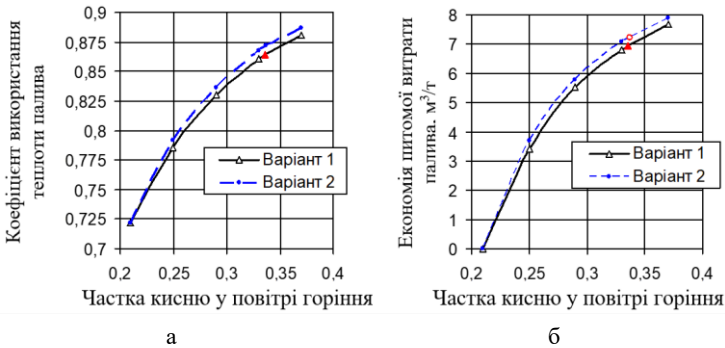


Рисунок 4 – Зміна коефіцієнта використання теплоти (а) та економія питомої витрати палива (б) для обох варіантів

У варіанті 2 економія палива на 4 % більша, але ця перевага може бути знецінена, якщо в рекуператорі має місце виток збагаченого повітря. Тому доцільно рекомендувати для впровадження організацію процесу змішування згідно варіанту 1, тобто змішування підігрітого в рекуператорі атмосферного повітря з технологічним киснем безпосередньо перед піччю.

Розробка АСК. Модернізована система керування дуттям кільцевої печі повинна реалізовувати збагачення вентиляторного повітря, що подається на горіння, технологічним киснем для інтенсифікації спалювання природного газу на існуючих пальникових пристроях печі. Система повинна автоматично підтримувати співвідношення «паливо-повітря-кисень». Причому, при використанні кисню необхідно зберегти штатний тепловий режим роботи кільцевої печі.

Для забезпечення заданого режиму нагрівання заготовок система повинна виконувати наступні функції: підтримку заданих значень температури за зонами печі і тиску в робочому просторі печі; вимір витрати газу, кисню й повітря горіння за зонами печі; індикацію показань датчиків температури, тиску і витрат; реєстрацію несправностей і аварійних ситуацій; архівування технологічних параметрів.

Для реалізації АСК розроблена функціональна схема автоматизації (рис. 5). В системі передбачено контроль температури в робочому просторі печі та повітря перед піччю, контроль тиску повітря, кисню та газу перед піччю, а також концентрації CO та O₂ в димових газах для визначення раціонального коефіцієнту співвідношення «газ-повітря». Регулювання витрати повітря, кисню та газу здійснюється за допомогою виконавчих механізмів типу МЕО, які задіюють регулючі заслінки на відповідних трубопроводах.

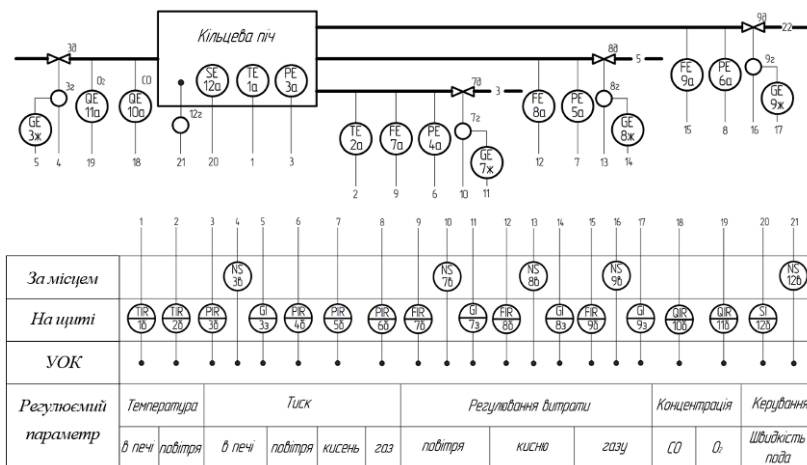


Рисунок 5 – Функціональна схема автоматизації режимом дуття кільцевої печі при його збагаченні технологічним киснем

На базі устаткування фірми Advantech скомпоновано управляючий обчислювальний комплекс, структурну схему якого зображено на рис. 6. На схемі позначено вхідні сигнали від датчиків та вихідні сигнали на виконавчі механізми. Для перетворення сигналів напруги від тахогенератора обрано нормалізатор напруги ADAM 3112. Для введення сигналів від датчиків призначений універсальний 8-канальний модуль аналогового вводу ADAM 4019, а для видачі управляючого сигналу модуль ADAM 4021. Для введення-виведення сигналів безпосередньо до комп'ютера та з нього, призначений модуль перетворювання сигналів ADAM 4520.

Для синтезу регуляторів використано інструментальний пакет Matlab / Nonlinear Control Design Blockset (NCD-Blockset). При моделюванні прийняті такі параметри об'єкта: для каналів витрати палива та кисню коефіцієнт підсилення $K_{OK} = 0,0056 \text{ (м}^3\text{/год)}/\%$ ходу регулюючого органу (РО); для каналу витрати повітря коефіцієнт підсилення $K_{OP} = 0,056 \text{ (м}^3\text{/год)}/\%$ ходу РО; постійна часу об'єкта $T_0 = 0,8 \text{ с}$; час чистого запізнювання $\tau_0 = 0,2 \text{ с}$. Максимально можливе значення збурювання $z = 10\%$ ходу РО. Вимоги до якості регулювання: припустима статична помилка $\Delta u = 0$; максимально припустиме відхилення для каналів газу та кисню $\Delta u_1 = 0,03$; для каналу повітря $\Delta u_1 = 0,3$; припустимий час регулювання $t_p = 5 \text{ с}$.

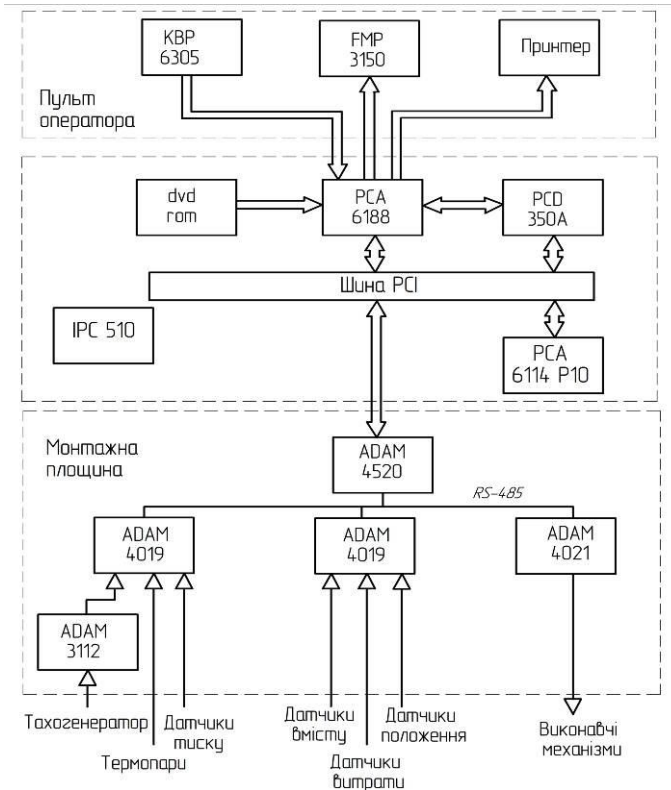


Рисунок 6 – Структурна схема управляючого обчислювального комплексу

Результати моделювання. В результаті дослідження на моделі обрані пропорційно-інтегруючі регулятори з такими параметрами: для каналів регулювання витрати палива та кисню – $k = 466,67$ і $T = 0,56$ с, а для каналу регулювання витрати повітря – $k = 46,67$ і $T = 0,56$ с.

Для перевірки роботи розробленої структури АСК та синтезованих регуляторів проведено комп'ютерне моделювання у пакеті Matlab/Simulink. Структурна модель АСК, складена з функціональних блоків Simulink, показана на рис. 7.

У цій моделі передбачена зміна завдання з витрати газу в залежності від заданої температури за зонами печі. За фактичною витратою газу розраховується сигнал завдання на витрату повітря, що надходить в регулятор витрати повітря, та, аналогічно, за фактичною витратою повітря розраховується сигнал завдання на витрату кисню.

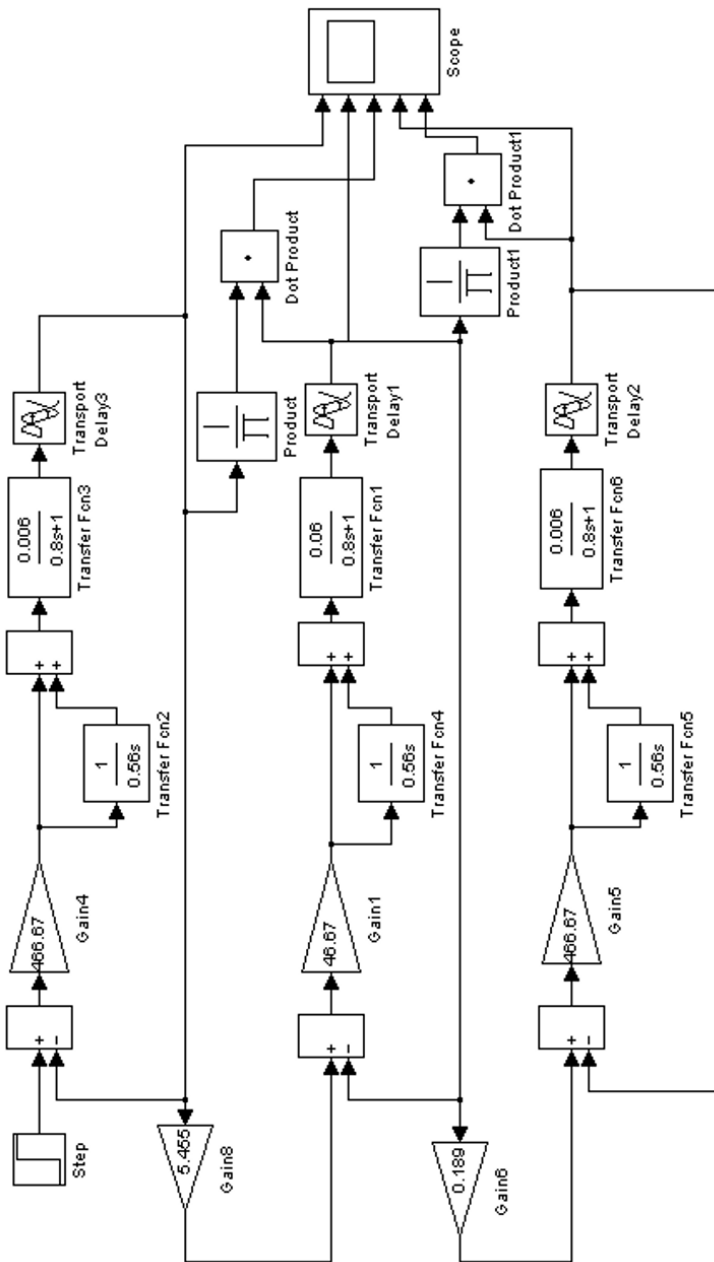


Рисунок 7 – Структурна схема комп'ютерної моделі динаміки співвідношення «паливо-повітря-кисень» при опалюванні кільцевої печі

На рисунку 8 зображено отримані графіки перехідних процесів при регулюванні. Як видно, при зміні завдання з витрати газу коефіцієнти витрати «газ-повітря» та «повітря-кисень» відхиляються від заданих значень. Але при цьому перерегулювання витрати газу, кисню і повітря не перевищує 30 %. Сталий режим досягається менш ніж за 4 с, що цілком припустимо для розроблювальної системи.

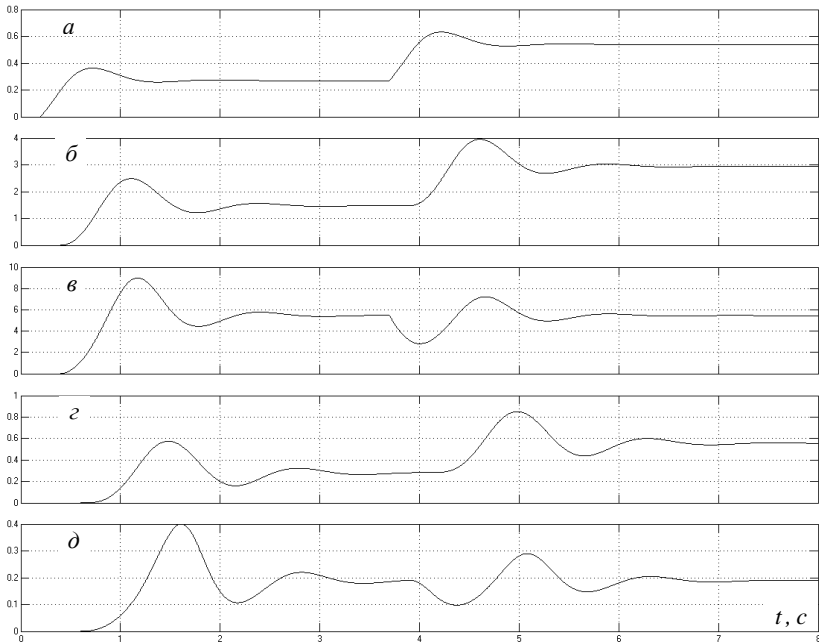


Рисунок 8 – Результати комп’ютерного моделювання динаміки співвідношення «паливо-повітря-кисень» при опалюванні кільцевої печі. Умовні позначення: а) витрата газу ($\text{м}^3/\text{с}$); б) витрата повітря ($\text{м}^3/\text{с}$); в) співвідношення «газ-повітря»; г) витрата кисню ($\text{м}^3/\text{с}$); д) співвідношення «повітря-кисень»

Висновки

В роботі розглянуто альтернативні варіанти організації змішування технологічного кисню з атмосферним повітрям: 1) після підігріву атмосферного повітря в рекуператорі; 2) перед рекуператором з наступним підігрівом в рекуператорі суміші атмосферного повітря та технологічного кисню. З урахуванням техніко-економічної ситуації на підприємстві рекомендовано здійснити варіант змішування підігрітого атмосферного повітря з технологічним киснем після рекуператора.

Опрацьовано алгоритм керування таким комбінованим дуттям кільцевої печі. З урахуванням вимог технічного завдання розроблено відповідну систему керування з використанням мікропроцесорного обчислювального комплексу. За результатами комп'ютерного моделювання керування співвідношенням «газ-повітря-кисень» вибрані закони регулювання і визначені налаштування регуляторів витрати палива, підігрітого повітря і технологічного кисню, що забезпечують заданий тепловий режим нагрівальної кільцевої печі.

Визначено, що використання в кільцевій печі наявного ресурсу технологічного кисню 2000 м³/год дає можливість збільшити концентрацію кисню у повітрі дуття до 33,6 %. Це забезпечує підвищення енергоефективності печі та економію палива до 18 %. Річний очікуваний економічний ефект від впровадження заходу складе майже 10 млн. грн. Результати роботи можуть бути базою для створення автоматизованої системи керування комбінованим дуттям кільцевої печі.

Таким чином підтверджено ефективність застосування розробленої системи автоматичного регулювання співвідношення «газ-повітря-кисень» для забезпечення заданого теплового режиму нагрівальної кільцевої печі.

Перелік посилань

1. Дослідження ефективності використання технологічного кисню при опаленні теплотехнічних металургійних агрегатів / Л. П. Грес, О. В. Гупало, О. О. Єрьомін, Є. О. Каракаш, Е. К. Д'якова. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2019. № 3-4. С. 14-24.

2. Чуприна Л. В., Терентьев В. І. *Технологічна інструкція ТІ 243-Тр4-01-02 «Прокатка труб на установці з пільгримовими станами 5-12" в ТПЦ-4»*. Дніпропетровськ: ТОВ «Нижньодніпровський трубопрокатний завод», 2002. 85 с.

3. Гупало Е. В., Стромєнко А. С., Яшний В. В. Использование излишков технологического кислорода в нагревательных печах трубопрокатного цеха / XVII International scientific conference "New technologies and achievements in metallurgy and material engineering and production engineering". Series: Monographic Nr 56. Czestochowa, 2016. P. 500-503.

References

1. Gres, L. P., Gupalo, O. V., Yeromin, O. O., Karakash, Ye. O., & Diakova, E. K. (2019). Research on the efficiency of the use of process oxygen to enrich the combustion air in metallurgical heating equipment. *Metallurhiina ta hirnichorudna promyslovist*, (3-4). P. 14-24. <http://doi.org/10.34185/0543-5749.2019-3-4-14-24>

2. Chupryna, L. V., & Terentiev, V. I. (2002). *Tekhnologichna instruktsiia TI 243-Tr4-01-02 "Prokatka trub na ustanovtsi z pilyhrymovymy stanamy 5-12" v TPTs-4"*. PJSC "NTZ".

3. Gupalo, E. V., Stromenko, A. S., & Yashnyi, V. V. (2016). Using of process

oxygen surplus into heating furnaces of tube-rolling shop. In *XVII International scientific conference "New technologies and achievements in metallurgy and material engineering and production engineering"*. Series: Monographic No. 56. Czestochowa. P. 500-503.

M. V. Mykhailovskiy¹, Ph.D, (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-9960-6189

O. V. Gupalo¹, Ph. D, (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-3145-9220

O. P. Yehorov¹, Ph. D, (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-9867-0437

V. I. Shybakinskyi¹, Ph. D, (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0009-0003-4387-8315

¹ *Ukrainian State University of Science and Technologies*

DEVELOPMENT OF ASC IN THE BLOWING MODE OF THE RING FURNACE WHEN ENRICHING THE BLOW WITH PROCESS OXYGEN

Abstract. The promising measures to increase the energy efficiency of ring furnaces is to increase the air heating temperature by transferring the ring furnace to a regenerative heating system and enrichment of combustion air with process oxygen. The use of regenerative burner devices requires significant investments. At the same time, in the presence of surplus process oxygen and limited investment opportunities of the enterprise, it is advisable to implement the technology of heating metal in oxygen-enriched air. The thermal operation of ring furnace of pipe rolling workshop No. 4 of PJSC "Interpipe NTZ", which operates on atmospheric and oxygen-enriched air, was studied. Two options for organizing the mixing of process oxygen with atmospheric air were considered: 1) after heating atmospheric air in the recuperator; 2) before the recuperator with subsequent heating in the recuperator of a mixture of atmospheric air and process oxygen. To implement the measure, a temperature regime for the furnace operation on oxygen-enriched air was developed. Based on the analysis of the technical and economic situation at the enterprise, it is recommended to implement the option of mixing heated atmospheric air with process oxygen after the recuperator. The algorithm for controlling such the combined blast of ring furnace has been developed. Taking into account the requirements of the technical task, an appropriate control system using the microprocessor computing complex has been developed. Based on the results of computer modeling of "gas-air-oxygen" ratio control, the control laws have been selected and the settings of the fuel, heated air and process oxygen flow regulators have been determined, which ensure the specified thermal regime of the heating ring furnace. It has been determined that to use the available process oxygen resource of 2000 m³/h in the ring furnace, it is possible to increase the oxygen concentration in the blast air to 33.6%. This ensures an increase in the energy efficiency of furnace and fuel savings of up to 18%. The annual economic effect of implementing the measure will be almost 10 million UAH. The results of the work can be the basis for creating an automated control system for the combined blast of the ring furnace.

Key words: ring furnace, blowing mode, process oxygen, automated control system, computer modeling.

*"Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії". 2024. Випуск 38.
"Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy". 2024. Issue 38
ISSN 2522-9117 (print), ISSN 2786-6149 (online)*

For citation: Mykhailovskyi, M. V., Gupalo, O. V., Yehorov, O. P., & Shybakinskyi, V. I. (2024). Development of ASC in the blowing mode of the ring furnace when enriching the blow with process oxygen. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, No. 38, P. 741-752. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-741-752>

*Стаття надійшла до редакції збірника 11.10.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)*