

УДК 536:24:532.517

<https://doi.org/10.34185/tpm.3.2021.01>

Єр'омін О. О., Гупало О. В., Радченко Ю. М., Римар М., Кізек Я., Куликов А.

## Дослідження процесів тепло- та масообміну в металургійній печі при збагаченні повітря горіння технологічним киснем.

Yeromin O., Gupalo O., Radchenko Yu., Rimar M., Kizek J., Kulikov A.

## The study of heat and mass transfer in the metallurgical furnace, which uses oxygen-enriched air for fuel combustion.

Метою роботи є підвищення енергоефективності нагрівальних пристроїв металургійних підприємств шляхом застосування технології спалювання палива при збагаченні повітря горіння технологічним киснем.

Методика дослідження заснована на використанні методів математичного моделювання та фундаментальних законів газодинаміки та тепло- і масообміну. Розроблено математичну модель, яка враховує конвективну та випромінюючу складові процесу теплообміну між димовими газами і металом, дозволяє визначати температурні поля металу і газів та поле швидкості газів уздовж робочого простору печі безперервної дії. Відмінною рисою розробленої моделі є можливість застосування її для печей, в яких спалювання палива відбувається з використанням атмосферного або збагаченого киснем повітря.

Результати. З використанням розробленої математичної моделі досліджено теплову роботу печі, в яку на спалювання палива подається повітря з вмістом кисню 21, 27 або 33 %. Розроблено енергоефективні режими нагрівання металу та визначено зміну температурних полів металу в робочій камері печі, витрат палива, атмосферного повітря та технологічного кисню, а також показників енергоефективності печі в залежності від вмісту кисню в повітрі горіння. Розрахунки виконано при нехтуванні конвективною складовою теплообміну та при врахуванні конвективної складової тепловіддачі від димових газів до металу.

Наукова новизна роботи полягає у визначенні похибки розрахунків при нехтуванні конвективною складовою теплообміну в робочій камері печі, яка не перевищує 3,8 % для температурного поля металу, 5,1 % для температурного поля димових газів, 5,9 % для температури повітря горіння та 1,2 % для питомих витрат атмосферного повітря й кисню, а також показників енергоефективності печі. Отримані результати доказують правомірність використання математичних моделей, в яких конвективна складова теплообміну не береться до уваги, при розробці енергоефективних режимів нагрівання металу при збагаченні повітря горіння киснем до 33%.

Практична значущість роботи полягає в розробленій математичній моделі, яка може використовуватися для розробки енергоефективних режимів нагрівання металу в металургійних печах безперервної дії при спалюванні палива з використанням атмосферного або збагаченого киснем повітря.

Ключові слова: піч, теплообмін, масообмін, конвекція, теплове випромінювання, кисень, збагачене киснем повітря.

**The purpose** of the study is to increase the energy efficiency of heating furnaces of metallurgical plants by applying the technology of fuel combustion with oxygen-enriched air.

**The methodology** is based on mathematical modelling methods and fundamental laws of gas dynamics and heat and mass transfer. A mathematical model has been developed that considers the convective and radiating components of the heat exchange and allows to determine the temperature fields of metal and gases and the gas velocity field lengthwise the working space of a continuous furnace. A distinctive feature of the model is the possibility of its application for furnaces where fuel combustion takes place using atmospheric or oxygen-enriched air.

**Findings.** The furnace's thermal operation was studied using the developed mathematical model. The fuel combustion was researched when the oxygen content in the air reached 21, 27 and 33%. The energy-efficient modes of metal heating were developed. The change of metal temperature fields in the furnace chamber, the consumptions of fuel, atmospheric air and process oxygen, and the furnace's energy efficiency indicators were also determined. All the mentioned parameters were determined in dependence on the oxygen content in the combustion air. The calculations were performed by neglecting or taking into account the convective component of heat transfer.

**The study's originality** is to determine the relative error of calculations in the case of neglecting the convective component of heat transfer in the furnace's working chamber. It was found that the relative error did not exceed 3.8% for the metal temperature field, 5.1% for the flue gas temperature field, 5.9% for the temperature of the combustion air and 1.2% for specific consumptions of atmospheric air, and oxygen, and also for furnace's energy efficiency indicators. The obtained results prove the legitimacy of applying mathematical models in which the convective component of heat transfer is not taken into account. Moreover, it is valid for developing energy-efficient modes of metal heating when enriching the combustion air with oxygen up to 33%.

**The practical value** of the study is in the developed mathematical model that can be used to choose energy-efficient modes of metal heating in continuous metallurgical furnaces when fuel is burning with atmospheric or oxygen-enriched air.

Keywords: furnace, heat transfer, mass transfer, convection, thermal radiation, oxygen, oxygen-enriched air.

### 1. Вступ

Підвищення енергоефективності металургійно-

го виробництва може вирішуватися шляхом оптимізації паливно-енергетичних балансів підпри-

Єр'омін Олександр Олегович – д.т.н., проф. НМетАУ

Гупало Олена В'ячеславівна – к.т.н., доц. НМетАУ

Радченко Юрій Миколайович – к.т.н., доц. НМетАУ

Римар Мірослав – Словачія

Кізек Ян - Словачія

Куликов Андрій - Словачія

Yeromin Oleksandr – d.t.s., NMetAU

Gupalo Olena – c.t.s., NMetAU

Radchenko Yurii – c.t.s., NMetAU

Rimar Miroslav – CSc Technical University of Kosice Slovakia

Kizek Jan – doc.ind Technical University of Kosice Slovakia

Kulikov Andrii - PhD Technical University of Kosice Slovakia

ємств за рахунок повного використання власних енергоресурсів, удосконалення технологій виробництва, конструкцій і режимів роботи технологічних агрегатів. Одним з цінних енергоресурсів сучасних металургійних комбінатів є технологічний кисень. При неритмічній роботі основних споживачів кисню на підприємствах виникають його тимчасові надлишки, які при відсутності накопичувачів зазвичай скидаються в атмосферу. В той же час технологічний кисень може використовуватись для збагачення повітря, що подається на спалювання палива, або замість атмосферного повітря в якості окислювача. Дослідження, наведені в роботі [1], показали, що найвища ефективність використання кисню для збагачення повітря горіння досягається при його використанні в теплотехнічних агрегатах прокатних цехів – нагрівальних печах безперервної дії. Дана робота присвячена моделюванню теплової роботи такого агрегату та розробці технології спалювання палива у збагаченому повітрі.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми.

На металургійних підприємствах країн Західної Європи, США і Південної Кореї до 2009 р. 120 печей було спроектовано і введено в експлуатацію, або переведено на газокисневе спалювання палива [2]. Роботи в цьому напрямку продовжуються і по теперішній час [3 - 5]. Принцип безполум'яного спалювання палива в умовах високотемпературного підігрівання повітря розглянуто в роботі [6]. Зарубіжними компаніями розроблено низку пальникових пристроїв, які реалізують технологію безполум'яного газо-кисневого спалювання палива (Flameless Oxy-fuel Technology) [7 - 8], при якій здійснюється спалювання, як правило, природного газу, в технологічному кисні. Технологія DOC - Diluted Oxygen Combustion [9, 10] також передбачає спалювання газоподібного палива з киснем при значній мірі розведення продуктами згоряння газокисневих високошвидкісних горілчанних струменів. За рахунок розвиненої рециркуляції димових газів у печі температура факела може бути нижче, ніж при спалюванні палива з атмосферним повітрям в умовах відсутності рециркуляції пічних газів. Застосування цих технологій, в порівнянні з технологією спалювання палива в атмосферному повітрі, забезпечує 3 – 4 кратне зменшення об'єму продуктів згоряння, збільшення температури горіння палива і дворазове підвищення випромінювальної здатності факела [2]. Застосування кисню в теплових агрегатах призводить до підвищення їх продуктивності на 25 – 50 %, економії палива на 30 – 60 % (в залежності від конкретних умов виробництва), підвищення якості теплової обробки матеріалів та спрощення конструкції агрегату [3, 4, 6, 11-13]. У певних умовах можливе зниження угару металу і кількості шкідливих викидів у довкілля [3, 8, 10].

При всіх перевагах газокисневого спалювання палива застосування цієї технології на українських металургійних заводах стикається з низкою проблем: низька інвестиційна спроможність підприємств в розвиток та технічне переоснащення виробництва; циклічні зміни цін на металургійну продукцію, а отже і прибутків підприємств; різке коливання цін на енергоресурси; подальша залежність роботи реконструйованого агрегату від наявності технологічного кисню на підприємстві; неможливість відмовитися від газокисневого спалювання палива без повторної реконструкції агрегату, заміни пальників і модернізації допоміжного обладнання. Тому в Україні та пострадянських країнах технологічний кисень, як окислювач, в нагрівальних печах практично не застосовується [14 – 16].

Збагачення повітря горіння киснем можна вважати альтернативним шляхом підвищення енергоефективності теплотехнічних агрегатів. Його впровадження не потребує значних інвестицій на заміну обладнання та реконструкцію агрегату і не призводить до виникнення загрози зупинки виробництва у разі затримки постачання кисню, або до значного збільшення собівартості виробництва у разі стрімкого зростання його ціни.

Збільшення вмісту кисню в повітрі зменшує баласт у вигляді азоту, а, отже, і питомий вихід димових газів, в результаті чого знижуються теплові втрати з димовими газами, що відходять. Також збільшується коефіцієнт використання теплоти палива та калориметрична температура. Таким чином, збагачення повітря горіння киснем впливає на показники теплової роботи агрегату аналогічно підвищенню температури підігріву повітря. Іноді ці фактори протиставляють один одному, припускаючи, що рішення проблеми виробництва дешевого технологічного кисню у великих кількостях здатне витіснити глибоку утилізацію теплоти диму, що відходить. Іноді високотемпературний підігрів повітря і спалювання палива в чистому кисні розглядають як конкуруючі технології [17, 18]. Проте, автори більшості робіт приходять до висновку, що кінцевий вибір технології, а також ступеня збагачення повітря киснем залежить від конкретних умов виробництва, цін на енергоносії та інвестиційних можливостей підприємства.

У роботах [15, 16] проаналізовано можливість економії палива в нагрівальних печах безперервної дії при вмісті кисню у повітрі, що змінюється в межах 21 – 100 %. Показано, що ефективність збагачення повітря киснем вища в агрегатах з більш низькими показниками енергоефективності. На практиці вміст кисню в повітрі можна обмежити 45 – 50 %, оскільки подальше збагачення повітря не призводить до значного зростання економії палива.

Дослідження, виконані в [15], показали, що збільшення вмісту кисню в повітрі до 25 % для нагрівальних печей ВАТ «БМЗ» забезпечує економію природного газу на 1,6 – 2,7 %. Також автори зазначають, що значне збагачення повітря киснем

призводить до необхідності реконструкції окремих вузлів печі, що викликає збільшення капітальних витрат на впровадження заходу.

Збагачення повітря киснем також впливає на роботу пальників. При збільшенні вмісту кисню в повітрі межі регулювання пальників скорочуються. При впровадженні заходу і розрахунку капітальних витрат на його реалізацію необхідно проводити аналіз зміни діапазону регулювання пальників, яке особливо важливо при роботі печі в широкому діапазоні зміни продуктивності, і розглядати необхідність заміни пальників [15, 19].

При розрахунку економічного ефекту слід також враховувати і вартість технологічного кисню, на яку істотно впливає технологія його виробництва. За даними [2] енерговитрати на отримання кисню в залежності від застосованої технології можуть відрізнятися в 3,5 рази (від 330 до 1150 кВт·год/тис. м<sup>3</sup> кисню).

### 3. Мета і завдання досліджень

Метою даної роботи є підвищення енергоефективності нагрівальних пристроїв металургійних підприємств шляхом застосування технології спалювання палива при збагаченні повітря горіння технологічним киснем.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно:

- розробити математичну модель тепло- масообміну і руху газів в нагрівальній печі, яка дозволяє одночасно враховувати конвективну і випромінюючу складові теплообміну між димовими газами й металом;

- з використанням розробленої моделі дослідити зміну температурних полів металу й димових газів уздовж робочого простору печі та розрахувати показники її енергоефективності в залежності від ступеня збагачення киснем повітря горіння;

- розробити енергоефективні режими нагрівання металу до заданих кінцевих параметрів при заданій продуктивності при найменшій витраті палива для випадків роботи печі як на атмосферному, так і на збагаченому киснем повітрі;

- визначити правомірність застосування математичної моделі теплообміну випромінюванням для розрахунків теплової роботи печей, в яких спалювання палива відбувається зі збагаченим киснем повітрям;

- визначити рівень похибки розрахунків, яка виникає при нехтуванні конвективною складовою теплообміну в робочому просторі печі безперервної дії, та встановити межі застосування спрощених математичних моделей для інженерних розрахунків таких печей при їх роботі на атмосферному повітрі або повітрі, збагаченому киснем до 33 %.

### 4. Матеріали та методи дослідження

В якості об'єкту дослідження вибрано піч безперервної дії для нагрівання заготовок перед обробкою тиском. При побудові математичної моделі тепло- масообміну і руху газів робочий простір печі розділено на шість технологічних зон. В якості вихідних

даних задаються: склад палива і коефіцієнт витрат повітря; частка кисню в повітрі горіння ( $k_{O_2}$ ); геометричні розміри заготовок та марка сталі; температура посадки металу та кінцеві параметри його нагріву (температура поверхні і перепад температур по перетину заготовки наприкінці нагрівання); продуктивність печі та геометричні розміри робочого простору (висота, ширина, довжина технологічних зон; товщина слоїв футерівки печі; ступені чорноти металу і кладки; температура повітря горіння; температура продуктів згоряння, що відходять з печі; температури газів в опалюваних зонах печі; теплофізичні властивості сталі та матеріалів футерівки печі; допустима відносна похибка розрахунку ( $\delta_{доп}$ ).

За методикою, наведеною в [20], виконуються розрахунки горіння палива з визначенням теоретичної і дійсної витрат атмосферного повітря; витрати технологічного кисню; теоретичної і дійсної витрат повітря горіння, яке збагачене киснем; питомого виходу продуктів згоряння; складу димових газів та залежності ентальпії диму від температури.

Розрахунок нагрівання заготовок виконується за методиками, що наведені в [21, 22]. Під час розрахунку визначаються параметри зовнішнього теплообміну; тривалість нагрівання металу; зміна температурного поля в заготовці, що нагрівається, та зміна температур димових газів, печі та внутрішньої поверхні її футерівки; теплові потоки від димових газів на метал; теплові втрати робочим простором печі в технологічних зонах. Оскільки значення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією заздалегідь невідомі у зв'язку з відсутністю даних про швидкості диму в робочому просторі печі, то у першому наближенні розрахунки проводять без урахування конвективної складової.

За методикою [21], розраховуються теплові втрати робочим простором зон печі, визначаються витрати палива на кожну зону та на піч в цілому, складається тепловий баланс печі та визначаються техніко-економічні показники її роботи (загальна теплова потужність, коефіцієнт корисної дії (ККД), питомі витрати палива та технологічного кисню).

Далі виконується розрахунок підігрівання повітря в рекуператорі [21].

На наступному етапі визначається зміна поля швидкості димових газів уздовж печі та розраховуються середньовитратні швидкості димових газів на межах технологічних зон. Із критеріального рівняння, отриманого для умов поперечного обтікання циліндру [23], визначаються числа Нуссельта на межах технологічних зон:

$$Nu_i = \varepsilon \cdot c \cdot Re_i^n,$$

де  $\varepsilon$  – поправка на кут атаки;  $c$  та  $n$  – емпіричні коефіцієнти [23];  $Re_i$  – число Рейнольдса на межі  $i$ -тої зони.

За розрахованими числами Нуссельта визначаються коефіцієнти тепловіддачі конвекцією на

межах технологічних зон печі  $\alpha_{ki}$ , середні коефіцієнти тепловіддачі в зонах  $\bar{\alpha}_{ki}$  і повторюються розрахунки нагрівання металу, теплових втрат, показників енергоефективності печі й рекуператора з урахуванням конвективної тепловіддачі й корегуванням прийнятих у вихідних даних температурного режиму печі та температури повітря горіння.

Розроблена розрахункова математична модель може застосовуватись для дослідження процесів теплообміну й руху газів в печі безперервної дії, в якій для спалювання палива використовується як атмосферне так і збагачене киснем повітря.

5. Результати дослідження

Моделювання виконано для печі, в якій нагріваються циліндричні заготовки холодного посаду діаметром 0,57 м, довжиною 1,9 м. Піч опалюється природним газом з теплою згоряння 34,372 МДж/м<sup>3</sup>. Коефіцієнт витрати повітря горіння 1,05. Кінцеві параметри нагріву металу: температура поверхні 1270 °С; перепад температур по товщині заготовки 20 °С. Продуктивність печі – 60 т/год. Основні розміри робочого простору: ширина 4,9 м; висота 2,04 м; довжина активного поду 75,69 м. Піч розділена на шість технологічних зон, які по відношенню до активної площі поду складають: методична – 20 %, перша, друга, третя та четверта опалювальні зони по 15 %; п'ята опалювальна зона – 20 %. Для утилізації теплоти димових газів, що відходять, піч обладнано металевим рекуператором з площею поверхні теплообміну 200 м<sup>2</sup>, який забезпечує підігрівання повітря до 270 °С.

Розрахунки виконано при спалюванні палива з атмосферним повітрям та з повітрям, збагаченим технологічним киснем. Частка кисню в повітрі

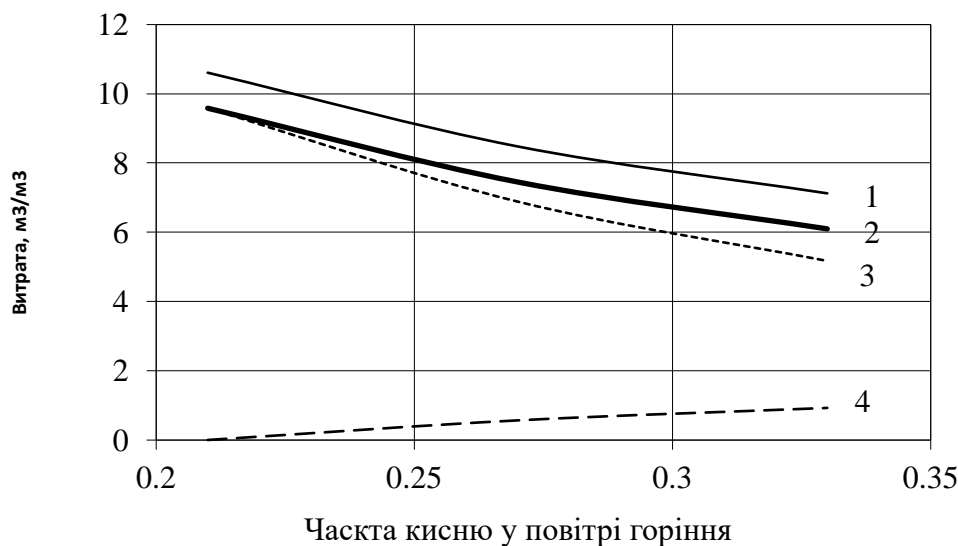
складала:  $k_{O_2} = 0,21$  – для атмосферного повітря;  $k_{O_2} = 0,27$  та  $0,33$  – для збагаченого повітря. Вміст кисню в повітрі горіння обмежено 33 %, оскільки для двопровідних пальників, якими обладнано існуючі печі такого типу, подальше збагачення повітря горіння є небажаним, оскільки призводить до звуження меж регулювання витрат палива та повітря і може порушувати роботу пальників [24, 19].

З метою визначення впливу конвективної складової на процес теплообміну та точність результатів розрахунку температурного поля металу і показників енергоефективності печі моделювання виконано для двох варіантів:

1) без урахування конвективної тепловіддачі ( $\alpha_{ki} = 0$ );

2) з урахуванням тепловіддачі конвекцією. При цьому результати моделювання, отримані за першим варіантом, використовуються для визначення коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha_{ki}$  на межах технологічних зон печі, а потім виконуються повторні розрахунки нагрівання металу і показників енергоефективності теплового агрегату, які передбачають корегування температурного режиму печі для забезпечення її роботи з прийнятною продуктивністю.

Під час виконання досліджень для обох варіантів, що розглядаються, розроблено режими нагрівання металу, які дозволяють забезпечити нагрівання заготовок до заданих кінцевих параметрів при заданій продуктивності при найменшій витраті палива. Зазначені енергоефективні режими нагрівання розроблено для випадків роботи печі як на атмосферному так і на збагаченому киснем повітрі.



1 – питомий вихід продуктів згоряння, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  
 2 – дійсна витрата збагаченого повітря м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  
 3 – дійсна витрата атмосферного повітря, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  
 4 – дійсна витрата технологічного кисню, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.  
 Рисунок 1 – Результати розрахунку горіння палива при n = 1,05

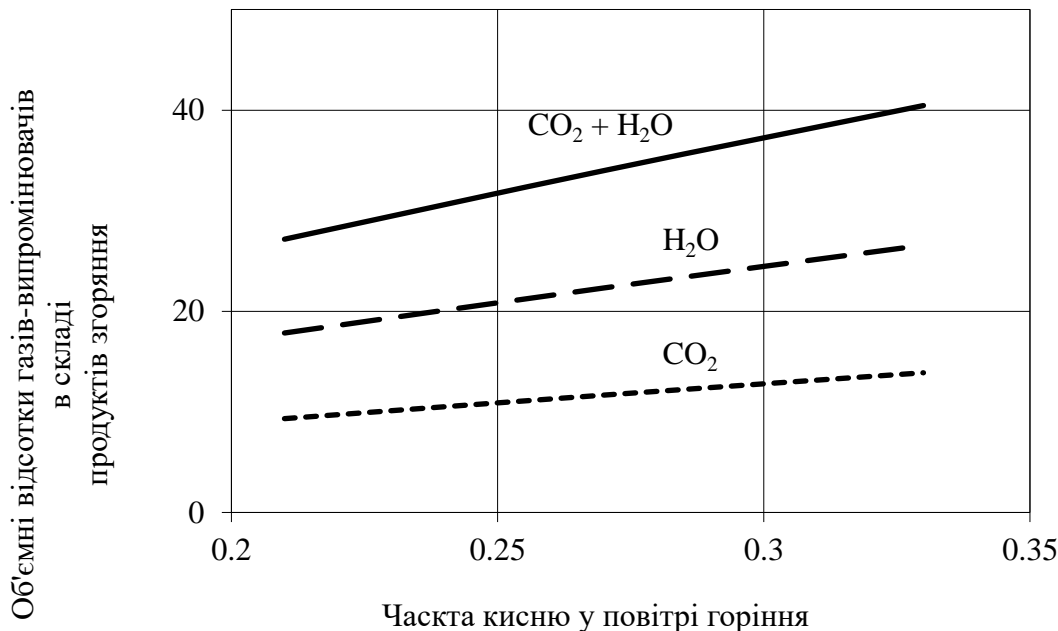
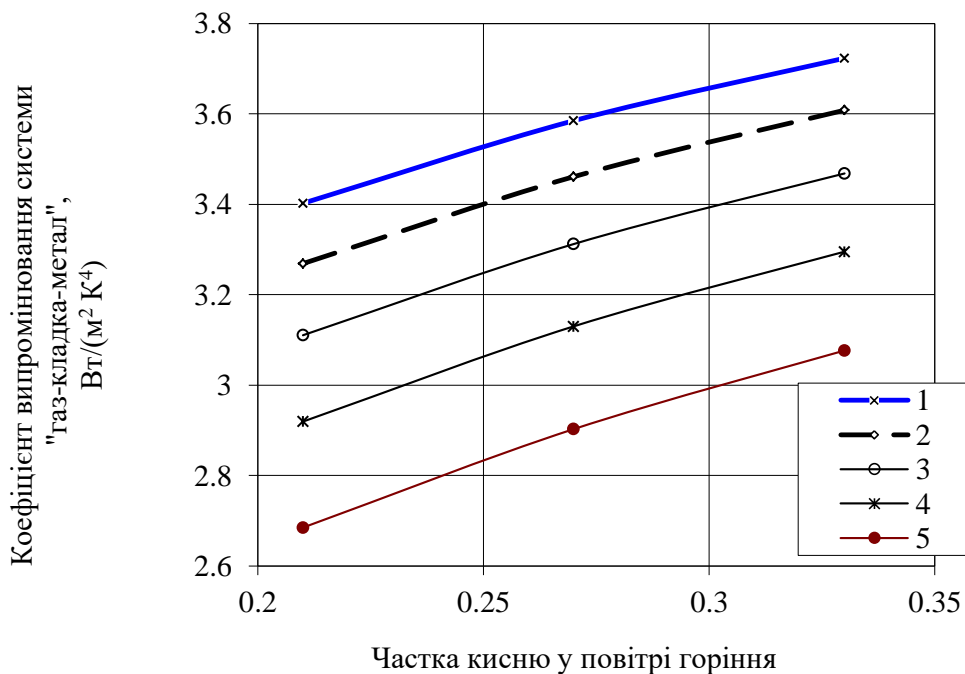


Рисунок 2 – Зміна складу продуктів згоряння при збагаченні киснем повітря горіння



Температури димових газів: 1 – 600 °С; 2 – 800 °С; 3 – 1000 °С; 4 – 1200 °С; 5 – 1400 °С

Рисунок 3 – Зміна коефіцієнта випромінювання системи «газ-кладка-метал» при збагаченні киснем повітря горіння

На рис. 1 – 3 наведено результати розрахунків горіння палива та параметрів зовнішнього теплообміну в залежності від ступеня збагачення повітря горіння киснем. На рис. 4 наведено результати моделювання руху димових газів та зміну коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією уздовж робочого простору печі. За результатами моделювання

процесів тепло- масообміну і руху газів з урахуванням конвективної тепловіддачі визначено вплив конвекції на загальний процес теплообміну (див. рис. 5).

Результати моделювання температурного поля металу та димових газів, а також зміни показників енергоефективності печі в залежності від ступеня

збагачення повітря горіння киснем наведено в таблицях 1 та 2.

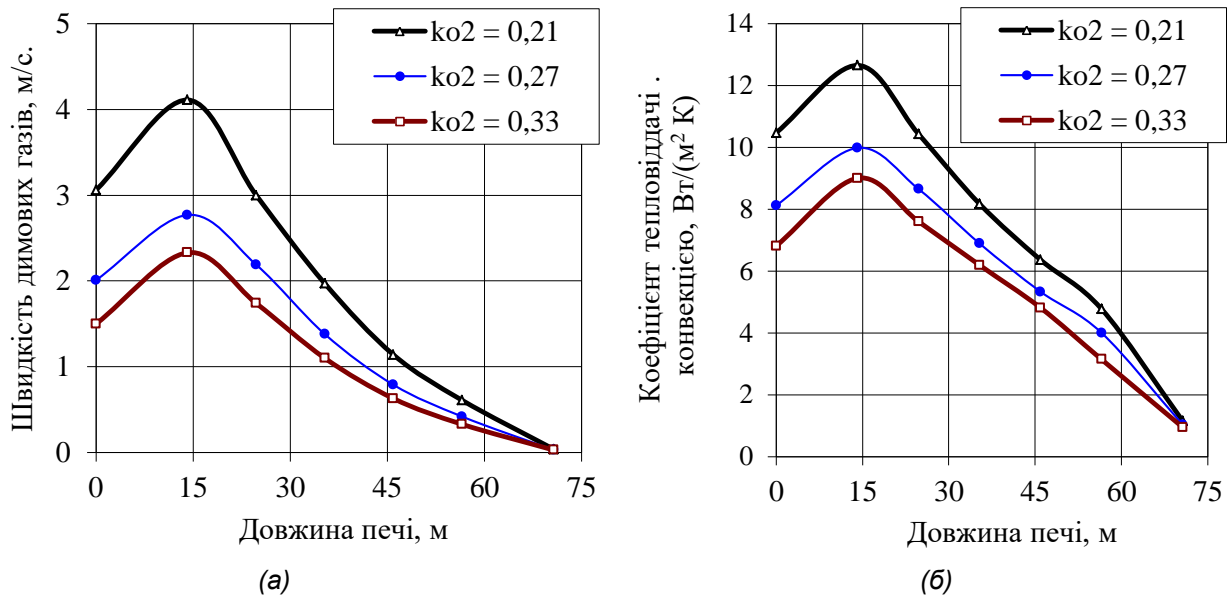


Рисунок 4 – Зміна швидкості димових газів (а) і коефіцієнту тепловіддачі конвекцією (б) уздовж печі

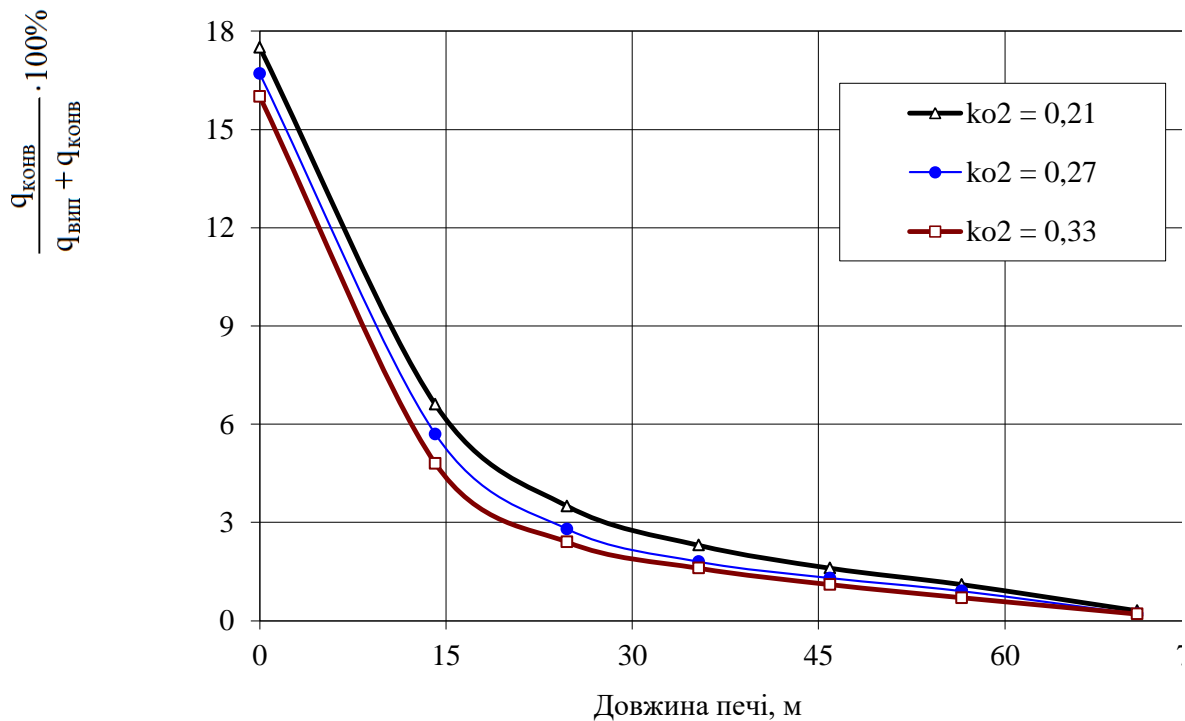


Рисунок 5 – Вплив конвективної тепловіддачі на процес теплообміну в робочому просторі печі в залежності від ступеня збагачення повітря горіння киснем

Таблиця 1 – Результати розрахунку температурного поля заготовок\*

Показник		Частка кисню у повітрі горіння			Похибка результатів розрахунків, %		
		0,21	0,27	0,33	0,21	0,27	0,33
Температура поверхні заготовки на межах зон печі, °С	на початку нагрівання	<u>20</u> 20	<u>20</u> 20	<u>20</u> 20	0,0	0,0	0,0
	наприкінці зони 1	<u>596</u> 592	<u>570</u> 585	<u>524</u> 536	0,7	1,7	2,2
	наприкінці зони 2	<u>950</u> 952	<u>933</u> 946	<u>919</u> 922	0,2	2,1	0,3
	наприкінці зони 3	<u>1107</u> 1108	<u>1097</u> 1105	<u>1089</u> 1092	0,1	0,7	0,3
	наприкінці зони 4	<u>1201</u> 1199	<u>1200</u> 1197	<u>1200</u> 1198	0,2	0,3	0,2
	наприкінці зони 5	<u>1247</u> 1247	<u>1248</u> 1248	<u>1248</u> 1248	0,0	0,0	0,0
	наприкінці нагрівання	<u>1270</u> 1270	<u>1270</u> 1270	<u>1270</u> 1270	0,0	0,0	0,0
Середньомасова температура заготовки на межах зон печі, °С	на початку нагрівання	<u>20</u> 20	<u>20</u> 20	<u>20</u> 20	0,0	0,0	0,0
	наприкінці зони 1	<u>431</u> 425	<u>398</u> 410	<u>358</u> 368	1,4	0,5	2,7
	наприкінці зони 2	<u>765</u> 769	<u>740</u> 752	<u>731</u> 731	0,5	1,59	0,0
	наприкінці зони 3	<u>975</u> 979	<u>957</u> 971	<u>945</u> 949	0,4	1,4	0,4
	наприкінці зони 4	<u>1134</u> 1134	<u>1127</u> 1131	<u>1122</u> 1124	0,0	0,4	0,2
	наприкінці зони 5	<u>1215</u> 1215	<u>1214</u> 1214	<u>1213</u> 1213	0,0	0,0	0,0
	наприкінці нагрівання	<u>1260</u> 1260	<u>1260</u> 1260	<u>1260</u> 1260	0,0	0,0	0,0
Температура центру заготовки на межах зон печі, °С	на початку нагрівання	<u>20</u> 20	<u>20</u> 20	<u>20</u> 20	0,0	0,0	0,0
	наприкінці зони 1	<u>265</u> 258	<u>227</u> 236	<u>192</u> 199	2,7	3,8	3,5
	наприкінці зони 2	<u>279</u> 286	<u>548</u> 559	<u>543</u> 540	2,4	1,9	0,6
	наприкінці зони 3	<u>843</u> 850	<u>818</u> 836	<u>802</u> 806	0,8	2,2	0,5
	наприкінці зони 4	<u>1067</u> 1070	<u>1055</u> 1066	<u>1045</u> 1055	0,3	1,0	0,9
	наприкінці зони 5	<u>1183</u> 1183	<u>1181</u> 1180	<u>1179</u> 1178	0,0	0,1	0,1
	наприкінці нагрівання	<u>1250</u> 1250	<u>1250</u> 1250	<u>1250</u> 1250	0,0	0,0	0,0

\* У чисельнику результати розрахунків для варіанту 1, у знаменнику – для варіанту 2

Таблиця 2 – Техніко-економічні показники печі\*

Показник		Частка у повітрі горіння кисню			Похибка результатів розрахунків, %		
		0,21	0,27	0,33	0,21	0,27	0,33
Температура, °С	димових газів, що відходять з печі	<u>770</u> 750	<u>680</u> 650	<u>620</u> 590	2,7	4,6	5,1
	атмосферного повітря на виході з рекуператора	<u>270</u> 261	<u>261</u> 242	<u>250</u> 231	3,4	7,9	8,2
	повітря горіння	<u>270</u> 261	<u>232</u> 215	<u>198</u> 187	3,4	7,9	5,9
Температурний режим печі, °С	зона 1	<u>1120</u> 1100	<u>1110</u> 1100	<u>1080</u> 1070	1,8	0,9	0,9
	зона 2	<u>1200</u> 1190	<u>1190</u> 1190	<u>1170</u> 1170	0,8	0	0
	зона 3	<u>1250</u> 1245	<u>1240</u> 1240	<u>1230</u> 1230	0,4	0	0
	зона 4	<u>1270</u> 1265	<u>1270</u> 1265	<u>1270</u> 1265	0,4	0,4	0,4
	зона 5	<u>1280</u> 1280	<u>1280</u> 1280	<u>1279</u> 1279	0	0	0
Витрата на піч, м <sup>3</sup> /год	палива	<u>2503</u> 2475	<u>2276</u> 2252	<u>2155</u> 2137	1,1	1,1	0,8
	атмосферного повітря	<u>23979</u> 23711	<u>15672</u> 15506	<u>11144</u> 11049	1,1	1,1	0,9
	технологічного кисню	–	<u>1288</u> 1274	<u>1996</u> 1979	–	1,1	0,9
	повітря горіння	<u>23979</u> 23711	<u>11960</u> 16781	<u>13140</u> 13028	1,1	1,1	0,9
	продуктів згорання	<u>26547</u> 26251	<u>19296</u> 19092	<u>15352</u> 15221	1,1	1,1	0,9
Питома витрата, м <sup>3</sup> /т	палива	<u>41,71</u> 41,25	<u>37,93</u> 37,53	<u>35,92</u> 35,61	1,1	1,1	0,9
	технологічного кисню	–	<u>21,47</u> 21,23	<u>33,27</u> 32,98	–	1,1	0,9
Загальна теплова потужність печі (M <sub>зар</sub> ), МВт		<u>23,90</u> 23,63	<u>21,73</u> 21,50	<u>20,58</u> 20,40	1,1	1,2	0,9
Коефіцієнт використання теплоти палива (КВТ)		<u>0,737</u> 0,745	<u>0,807</u> 0,817	<u>0,847</u> 0,856	1,1	1,2	1,1
ККД печі, %		<u>61,30</u> 61,96	<u>67,37</u> 68,09	<u>71,15</u> 71,76	1,1	1,1	0,9
Коефіцієнт рекуперації теплоти		<u>0,253</u> 0,252	<u>0,216</u> 0,215	<u>0,240</u> 0,240	0,4	0,46	0
Питома економія палива, м <sup>3</sup> /т		–	<u>3,78</u> 3,72	<u>5,80</u> 5,63	–	1,6	3
Економія палива, %		–	<u>9,07</u> 9,01	<u>13,9</u> 13,66	–	0,7	1,8

\* У чисельнику результати розрахунків для варіанту 1, у знаменнику – для варіанту 2

#### 6. Обговорення результатів

Як видно з рисунків 1 і 2, збільшення частки кисню в повітрі горіння навіть в узькому діапазоні 0,21 – 0,33 різко зменшує кількість атмосферного повітря, необхідного для спалювання палива, в наслідок чого змінюється питомий вихід продуктів згорання, що утворюються при спалюванні палива, та склад димових газів. Так при підвищенні вмісту кисню в повітрі горіння до 33 % дійсна витрата атмосферного повітря знижується з 9,58 до 5,17 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, питомий вихід диму зменшується з

10,61 до 7,12 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, а сумарний відсоток газів-випромінювачів в їх складі зростає з 27,16 до 40,45 % за рахунок зменшення вмісту азоту в димі. В залежності від температури димових газів, збільшення вмісту вуглецевого газу та водяної пари в їх складі забезпечує збільшення ступеня чорноти диму та ступеня чорноти системи «газ-кладка-метал» на 10 – 15 % (див. рис. 3). Така зміна параметрів зовнішнього теплообміну підвищує вплив випромінювання в робочому просторі печі, в той час як зниження питомої витрати димових газів

при використанні кисню при спалюванні палива призводить до зниження швидкості димових газів та коефіцієнта конвективної тепловіддачі, в наслідок чого вплив конвекції в процесі теплообміну зменшується.

Як видно з рисунку 4, зміна коефіцієнта тепловіддачі конвекцією цілком обумовлена характером зміни швидкості димових газів, яка зростає в результаті накопичення диму, що рухається в сторону, протилежну руху металу. Максимальні коефіцієнти конвективної тепловіддачі мають місце на межі методичної і першої опалювальної зони, де димові гази мають найвищу швидкість руху. Подальше зниження величини коефіцієнтів тепловіддачі в методичній зоні обумовлене суттєвим зниженням їх швидкості за рахунок зниження температури газів.

Слід відзначити, що застосування кисню при спалюванні палива значно знижує швидкості руху димових газів уздовж робочого простору печі. Так при збільшенні частки кисню в повітрі горіння до 0,33 максимальне значення швидкості диму знижуються з 4,11 до 2,33 м/с, що призводить до зменшення відповідної величини коефіцієнта тепловіддачі з 12,65 до 9 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

На рис. 5 наведено результати розрахунків співвідношення конвективного теплового потоку до загального теплового потоку (конвекцією та випромінюванням) в робочому просторі печі. Як видно з рисунку, максимальний вплив конвекція відіграє в методичній зоні, тобто там, де димові гази характеризуються найбільшою швидкістю і різниця температур газів і металу є максимальною. В той же час в опалювальних зонах печі внесок конвекції в процес теплообміну не перевищує 7 % при роботі печі на атмосферному повітрі, 4,8 % – при збагаченні повітря горіння до вмісту кисню 33 %. Отже, збагачення киснем повітря горіння спричиняє зниження впливу конвективної тепловіддачі по всій довжині робочого простору печі.

Як видно з табл. 2, при використанні кисню для спалювання палива забезпечення заданих технологією продуктивності і якості нагрівання металу потребує корегування температурного режиму печі, яке передбачає зниження температур гріючих газів в опалювальних зонах. При цьому чим більший вміст кисню в повітрі горіння, тим більшого корегування потребує температурний режим печі.

Для забезпечення найкращих показників енергоефективності теплового агрегату, найбільше зниження температури гріючого газу повинно відбуватися в першій та другій опалювальних зонах. Це забезпечить зниження температури диму на виході з печі, що, в свою чергу, забезпечить зменшення питомої витрати палива на нагрівання металу.

Як свідчать результати розрахунків, збільшення  $k_{O_2}$  в діапазоні 0,21 – 0,33 потребує зниження температур в зонах 1 і 2, яке не перевищує 40 °С, при зберіганні температурного режиму в інших опалювальних зонах печі. Таким чином, матема-

тичне моделювання теплової роботи агрегату з метою розробки енергоефективних режимів нагрівання є необхідним і повинно виконуватися перед впровадженням заходу.

Порівняння варіантів розрахунків показує, що урахування конвективної складової під час моделювання практично не впливає на результати розрахунку температурного поля металу (див. табл. 1). У разі нехтування внеском конвекції в процес теплообміну (як це прийнято у варіанті 1) максимальна похибка виникає під час визначення температури центру заготовки наприкінці методичної зони печі (2,7 – 3,8 %). В той же час похибка розрахунку температурного поля газів досягає 2,7 – 5,1 % і має місце при визначенні температури димових газів, що відходять з теплового агрегату. Останнє призводить до виникнення похибки під час розрахунку температур підігріву повітря в рекуператорі, яка відповідно складає 3,4 % для  $k_{O_2} = 0,21$  та 5,9 – 7,9% при  $k_{O_2} = 0,27 - 0,33$ .

Незважаючи на цю обставину, похибка розрахунку питомих витрат палива, атмосферного повітря та кисню, загальної теплової потужності печі та її ККД не перевищує 1,2 %, що може вважатися цілком прийнятним для визначення техніко-економічних показників печі. Тому для розробки енергоефективних режимів нагрівання металу в печах безперервної дії, в яких на спалювання палива подається повітря з вмістом кисню 21 – 33 %, можна вважати допустимим використання спрощених математичних моделей, в яких внесок конвекції в процес теплообміну не береться до уваги.

Порівняння техніко-економічних показників печі, наведених в табл. 2, свідчить, що застосування кисню для збагачення повітря горіння є потужним чинником впливу на енергоефективність теплового агрегату. Так, підвищення вмісту кисню в повітрі до 27 % забезпечує зростання ККД печі на 6 % та економію природного газу 9,1 %, а збільшення вмісту кисню до 33 % – підвищення ККД на 9,8 %, та економію палива 13,7 %.

## 7. Висновки

1. Розроблено математичну модель тепло- й масообміну і руху газів в нагрівальній печі безперервної дії, яка враховує конвективну і випромінюючу складові процесу теплообміну між гріючим газом і металом. При заданих вихідних даних (геометричних та теплофізичних характеристиках металу, складі палива та умовах його спалювання, геометричних і технічних характеристиках печі) математична модель дозволяє визначити температурні поля металу і димових газів та поле швидкості газів уздовж робочого простору печі. Відмінною рисою розробленої моделі є можливість її застосування для печей, в яких спалювання палива відбувається з використанням як атмосферного, так і збагаченого киснем повітря.

2. З використанням розробленої моделі досліджено процеси тепло- й масообміну і руху газів в робочому просторі печі при вмісті кисню в повітрі горіння 21 – 33 %. Визначено, що збільшення час-

тки кисню в повітрі, що йде на спалювання палива, спричиняє зростання впливу теплового випромінювання в робочому просторі печі. В той же час вплив конвективної складової зменшується за рахунок зменшення швидкості димових газів, обумовленому зменшенню їх витрати. Максимальний вплив тепловіддача конвекцією має місце в методичній зоні печі, де на неї припадає від 16 – 17,5 % (в началі зони) до 4,8 – 6,6 % (наприкінці зони) від загального теплового потоку на метал. При цьому збільшення частки кисню в повітрі горіння призводить до зменшення впливу конвективної складової на процес теплообміну.

3. Виконано порівняння розрахунків температурних полів металу і газу в робочому просторі печі, отриманих під час моделювання тепло- й масообміну в печі при вмісті кисню в повітрі горіння 21 – 33 %. Визначено, що нехтування конвективною складовою під час моделювання призводить до максимальної похибки при визначенні температурного поля металу 3,8 %. Максимальна похибка при визначенні температури димових газів в опалювальних зонах печі не перевищує 1,8 %, а при визначенні температури диму, що відходить, – 5,1 %. Похибки розрахунків температури підігріву атмосферного повітря в рекуператорі та темпера-

тури повітря горіння не перевищують відповідно 8,2 % та 5,9 % і не впливають на точність визначення техніко-економічних показників печі. Так, максимальна похибка розрахунку питомих витрат палива, атмосферного повітря та кисню, загальної теплової потужності печі та її ККД не перевищує 1,2 %. Тому для виконання інженерних розрахунків печей безперервної дії, які працюють на атмосферному або збагаченому повітрі з вмістом кисню до 33 %, можна вважати допустимим використання спрощених математичних моделей, в яких внесок конвекції в процес теплообміну не береться до уваги.

4. Використовуючи методи математичного моделювання розроблено енергоефективні режими нагрівання металу в печі при її роботі на збагаченому киснем повітрі горіння. Визначено, що збільшення частки кисню в повітрі горіння є потужним чинником підвищення енергоефективності теплового агрегату у порівнянні з його роботою при спалюванні палива з атмосферним повітрям. Так, збільшення вмісту кисню в повітрі до 27 – 33 % дозволяє збільшити ККД печі на 6 – 9,8 % та забезпечити економію палива 9 – 13,7 % при питомій витраті кисню 21,2– 33 м<sup>3</sup>/т металу.

#### Бібліографічний опис

1. Грес Л. П., Гупало О. В., Єрьомін О. О., Каракас Є. О., Д'якова Е. К. Дослідження ефективності використання технологічного кисню при опаленні теплотехнічних металургійних агрегатів. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. Дніпро, 2019. № 3-4. С. 14–24. DOI: 10.34185/0543-5749.2019-3-4-14-24
2. Карп И. Н., Зайвий А. Н., Марцевой Е. П., Пьяных К. Е. Использование кислорода и обогащенного кислородом воздуха в нагревательных печах, колودцах, стендах разогрева сталеразливочных ковшей. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. Київ, 2012. № 3. С. 18–29
3. Khalid Y., Wu M., Silaen A., Martinez F., Okosun T., Worl B., Low J., Zhou C., Johnson K., White D. Oxygen enrichment combustion to reduce fossil energy consumption and emissions in hot rolling steel production. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 320, 128714. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128714
4. Martinez Zambrano F. J., Silaen A. K., Tian K., Maiolo J., Zhou. C. Reduction of fuel utilization through oxygen-enriched combustion in a reheat furnace pusher-type. *Proceedings of the ASME 2021 Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2021 15th International Conference on Energy Sustainability*. DOI: 10.1115/HT2021-63931
5. Worl B., Martinez F., Silaen A., Johnson K., Fabina L., Tian K., Maiolo J., Zhou C. Application of oxygen-enriched combustion in an industrial reheating furnace using CFD. *AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2021, P. 618–626. DOI: 10.33313/382/062
6. Rimar M., Kulikov A., Fedak M, Yeromin O., Sukhyy K., Gupalo O., Belyanovskaya E., Berta R., Smajda M., Ratnayake M. R. Mathematical model of a heating furnace implemented with volumetric fuel combustion. *Processes*, 2021. Vol. 8, Issue 4 469. DOI: 10.3390/pr8040469.
7. Erfurth F., Grzych J., Parron II R., Miller F., Hernandez M., Tian K., O'Connor D., Rosen L. Fuel Savings for Slab Reheating Furnaces through Oxyfuel Combustion. *AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2006, Vol. 2. P. 1071–1075.
8. Bool L.E., III, Docquier N., Periasamy C., Rosen L.J. Oxyfuel and oxygen-enhanced burner testing. *Oxygen-Enhanced Combustion. Second Edition*. 2013. CRC Press. P. 471–494.
9. *Dilute Oxygen Combustion – Phase 1 Report*. Report DOE/ID/13331-T1 (DE98052058) / U.S. Department of Energy. Washington DC. October, 1997. P. 62–72. URL: [https://webapp1.dlib.indiana.edu/virtual\\_disk\\_library/index.cgi/4297581/FID1887/m98052058.pdf](https://webapp1.dlib.indiana.edu/virtual_disk_library/index.cgi/4297581/FID1887/m98052058.pdf)
10. Riley M. F., Kobayashi H., Deneys, A. C. Praxair's dilute oxygen combustion technology for pyrometallurgical applications. *JOM*. 2001. Vol. 53. P. 21–24. DOI: 10.1007/s11837-001-0202-9
11. Oxy-fuel combustion in a rotary hearth heating furnace. URL: [http://www.linde-gas.com.cn/zh/images/OvakoRotaryHearth\\_tcm111-10855.pdf](http://www.linde-gas.com.cn/zh/images/OvakoRotaryHearth_tcm111-10855.pdf)

12. Black E., Erfurth F., Kitko G., Hernandez M., Kelly J., Rosen L., Tian K. Installation of a 145-MMBtu/hour oxyfuel firing system on the No. 2 reheat furnace at ArcelorMittal's 84-inch Hot Strip Mill. *Iron and Steel Technology*. 2010. Vol. 7. Issue 5. P 278–283.
13. Mike Lantz M., Hassenzahl D., Lugnet A., Ovako A.B., Moroz G., Carlsson A. 25 % Increased Reheating Throughput and 50 % Reduced Fuel Consumption by Flameless Oxyfuel at ArcelorMittal Shelby – Tubular Products, Ohio. *Iron & Steel Technol.* 2009. Vol. 6. Issue 9. P. 29–36.
14. Сорока Б. С. Системы сжигания и теплоутилизационные устройства технологических печей: Современное состояние и мировые тенденции. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. Київ, 2012. № 2. С. 54–68.
15. Кабишов С. М., Трусова И. А., Ратников П. Э., Менделев Д. В. Интенсификация тепловых процессов в высокотемпературных установках на примере нагревательных печей ОАО «БМЗ» путем обогащения воздуха воздушной смеси кислородом. *Литье и металлургия*. 2012. № 3 (67). С. 218–221.
16. Кабишов С. М., Трусова И. А., Ратников П. Э., Менделев Д. В. Экономические аспекты обогащения воздушного дутья кислородом в нагревательных и термических печах. *Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов*. Вып. 35. Минск: БНТУ, 2014. С. 8–16.
17. Kaufman J. S., Marino J. Regenerative Burners or Oxy-fuel Burners for your furnace upgrade? *Industrial heating*. 2011. June 2. URL: <https://www.industrialheating.com/articles/90063-regenerative-burners-or-oxy-fuel-burners-for-your-furnace-upgrade>
18. Fantuzzi M., Kaufman J. Tenova Regenerative flameless burners on California Steel Industries' new walking beam furnaces. *AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2013. Vol. 2. P. 2279–2290
19. Mokhatab S., Poe W.A., Mak J.Y. *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing: Principles and Practices. 4-th edition*. Cambridge, MA : Gulf Professional Publishing, 2019, 824 p. DOI: 10.1016/C2017-0-03889-2
20. *Металлургические печи : Теория и расчеты*. В 2-х т. Т. 1 / Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. – Минск : Белорус. наука, 2007. 596 с.
21. *Металлургические печи : Теория и расчеты*. В 2-х т. Т. 2 / Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. – Минск : Белорус. наука, 2007. 832 с.
22. Румянцев В. Д. *Теория тепло- и массообмена*. Днепропетровск : Пороги, 2006. 532 с.
23. Мاستрюков Б. С. *Теплотехнические расчеты промышленных печей*. М. : Металлургия, 1972. 368 с.
24. Ревун М. П., Потапов Б. Б., Ольшанский В. М., Бородулин А. В. *Высокотемпературные теплотехнические процессы и установки в металлургии*. Запорожье : ЗГИА, 2002. 443 с.

#### References

1. Hres L. P., Gupalo O. V., Yeromin O. O., Karakash Ye. O., Diakova E. K. Doslidzhennia efektyvnosti vykorystannia tekhnolohichnoho kysniu pry opalenni teplotekhnichnykh metalurhiinykh ahrehativ. *Metalurhiina ta hirnychorudna promyslovisht.* Dnipro, 2019. № 3-4. S. 14–24. DOI: 10.34185/0543-5749.2019-3-4-14-24
2. Karp I. N., Zajvyj A. N., Marcevoj E. P., Pyanyx K. E. Ispolzovanie kisloroda i obogashhennogo kislorodom vozduxa v nagrevatelnyx pechax kolodcax stendax razogreva stalerazlivochnyx kovshej. *Energo-tekhnologii i resursosberezhenie*. Kyiv, 2012. № 3. S. 18–29
3. Khalid Y., Wu M., Silaen A., Martinez F., Okosun T., Worl B., Low J., Zhou C., Johnson K., White D. Oxygen enrichment combustion to reduce fossil energy consumption and emissions in hot rolling steel production. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 320, 128714. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128714
4. Martinez Zambrano F. J., Silaen A. K., Tian K., Maiolo J., Zhou. C. Reduction of fuel utilization through oxygen-enriched combustion in a reheat furnace pusher-type. *Proceedings of the ASME 2021 Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2021 15th International Conference on Energy Sustainability*. DOI: 10.1115/HT2021-63931
5. Worl B., Martinez F., Silaen A., Johnson K., Fabina L., Tian K., Maiolo J., Zhou C. Application of oxygen-enriched combustion in an industrial reheating furnace using CFD. *AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2021, P. 618–626. DOI: 10.33313/382/062
6. Rimar M., Kulikov A., Fedak M., Yeromin O., Sukhyy K., Gupalo O., Belyanovskaya E., Berta R., Smajda M., Ratnayake M. R. Mathematical model of a heating furnace implemented with volumetric fuel combustion. *Processes*, 2021. Vol. 8, Issue 4 469. DOI: 10.3390/pr8040469.
7. Erfurth F., Grzych J., Parron II R., Miller F., Hernandez M., Tian K., O'Connor D., Rosen L. Fuel Savings for Slab Reheating Furnaces through Oxyfuel Combustion. *AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2006, Vol. 2. P. 1071–1075.
8. Bool L.E., III, Docquier N., Periasamy C., Rosen L.J. Oxyfuel and oxygen-enhanced burner testing. *Oxygen-Enhanced Combustion. Second Edition*. 2013. CRC Press. P. 471–494.
9. *Dilute Oxygen Combustion – Phase 1 Report*. Report DOE/ID/13331-T1 (DE98052058) / U.S. Department of Energy. Washington DC. October, 1997. P. 62–72. URL:

[https://webapp1.dlib.indiana.edu/virtual\\_disk\\_library/index.cgi/4297581/FID1887/m98052058.pdf](https://webapp1.dlib.indiana.edu/virtual_disk_library/index.cgi/4297581/FID1887/m98052058.pdf)

10. Riley M. F., Kobayashi H., Deneys, A. C. Praxair's dilute oxygen combustion technology for pyrometallurgical applications. *JOM*. 2001. Vol. 53. P. 21–24. DOI: 10.1007/s11837-001-0202-9
11. Oxy-fuel combustion in a rotary hearth heating furnace. URL: [http://www.linde-gas.com.cn/zh/images/OvakoRotaryHearth\\_tcm111-10855.pdf](http://www.linde-gas.com.cn/zh/images/OvakoRotaryHearth_tcm111-10855.pdf)
12. Black E., Erfurth F., Kitko G., Hernandez M., Kelly J., Rosen L., Tian K. Installation of a 145-MMBtu/hour oxyfuel firing system on the No. 2 reheat furnace at ArcelorMittal's 84-inch Hot Strip Mill. *Iron and Steel Technology*. 2010. Vol. 7. Issue 5. P 278–283.
13. Mike Lantz M., Hassenzahl D., Lugnet A., Ovako A.B., Moroz G., Carlsson A. 25 % Increased Reheating Throughput and 50 % Reduced Fuel Consumption by Flameless Oxyfuel at ArcelorMittal Shelby – Tubular Products, Ohio. *Iron & Steel Technol.* 2009. Vol. 6. Issue 9. P. 29–36.
14. Soroka B. S. Sistemy szhiganiya i teploutilizacionnye ustrojstva texnologicheskix pechej sovremennoe sostoyanie i mirovye tendencii. *Energotexnologii i resursosberezhenie*. Kyiv. 2012. № 2. P. 54–68.
15. Kabishov S. M., Trusova I. A., Ratnikov P. E., Mendeleev D. V. Intensifikaciya teplovyx processov v vysokotemperaturnyx ustanovkax na primere nagrevatelnyx pechej OAO "BMZ" putem obogashheniya vozduxa vozdushnoj smesi kislородom. *Lite i Metallurgiya*. 2012. № 3 (67). P. 218–221.
16. Kabishov S. M., Trusova I. A., Ratnikov P. E., Mendeleev D. V. Ekonomicheskie aspekty obogashheniya vozdushnogo dutya kislородom v nagrevatelnyx i termicheskix pechax. *Metallurgiya: respublikanskij mezhdvdomstvennyj sbornik nauchnyx trudov*. Vyp. 35. Minsk: BNTU, 2014. P. 8–16.
17. Kaufman J. S., Marino J. Regenerative Burners or Oxy-fuel Burners for your furnace upgrade? *Industrial heating*. 2011. June 2. URL: <https://www.industrialheating.com/articles/90063-regenerative-burners-or-oxy-fuel-burners-for-your-furnace-upgrade>
18. Fantuzzi M., Kaufman J. Tenova Regenerative flameless burners on California Steel Industries' new walking beam furnaces. *AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2013. Vol. 2. P. 2279–2290
19. Mokhatab S., Poe W.A., Mak J.Y. *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing: Principles and Practices. 4-th edition*. Cambridge, MA : Gulf Professional Publishing, 2019, 824 p. DOI: 10.1016/C2017-0-03889-2
20. *Metallurgicheskie pechi. Teoriya i raschety*. V 2-h t. T 1 / Pod obshh. red. V. I. Timoshpolskogo, V. .I Gubinskogo. – Minsk: Belorus. nauka, 2007. 596 p.
21. *Metallurgicheskie pechi. Teoriya i raschety*. V 2-h t. T 2 / Pod obshh. red. V. I. Timoshpolskogo, V. .I Gubinskogo. – Minsk: Belorus. nauka, 2007. 832 p.
22. Rumyancev V. D. *Teoriya teplo- i masoobmena*. Dnepropetrovsk. Porogi, 2006. 532 p.
23. Mastryukov B. S. *Teploexnicheskie raschety promyshlennyx pechej*. M. Metallurgiya, 1972. 368 p.
24. Revun M. P., Potapov B. B., Olshanskij V. M., Borodulin A. V. *Vysokotemperaturnye teplotexnicheskie processy i ustanovki v metallurgii*. Zaporozhe: ZGIA, 2002. 443 p.