

УДК 621.783.233.2

О.В. Гупало, доцент, канд. техн. наук
 О.О. Єрємін, зав. кафедри, доктор техн. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОЇ РОБОТИ КІЛЬЦЕВОЇ ПЕЧІ ІЗ ЗБАГАЧЕННЯМ ПОВІТРЯ ГОРІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ КИСНЕМ

Національна металургійна академія України, м. Дніпро

С использованием разработанной математической модели выполнено исследование тепловой работы кольцевой печи при обогащении воздуха горения технологическим кислородом (с 21 до 37 %) для двух вариантов смешивания кислорода с атмосферным воздухом. Установлено, что организация смешивания не оказывает существенного влияния на показатели тепловой работы печи. Максимальная экономия топлива достигается при содержании кислорода в воздухе горения 37 % и составляет 19,5 и 20,1 %, соответственно, для первого и второго вариантов. При ограничении на максимальный расход кислорода (2000 м³/ч) его содержание в воздухе горения составляет 33,6 %, а реализация мероприятия обеспечивает экономию природного газа 17,7 %.

Ключевые слова: кольцевая печь, природный газ, технологический кислород, обогащенный воздух, экономия топлива.

З використанням розробленої математичної моделі досліджено теплову роботу кільцевої печі за збагаченням повітря горіння технологічним киснем (з 21 до 37 %) для двох варіантів змішування кисню з атмосферним повітрям. Встановлено, що організація змішування суттєво не впливає на показники теплової роботи печі. Максимальна економія палива досягається за частки кисню у повітрі 0,37 і складає 19,5 та 20,1 %, відповідно, для першого та другого варіантів. За обмеженням на максимальну витрату кисню (2000 м³/год.) його вміст у повітрі горіння складає 33,6 %, а реалізація заходу забезпечує економію природного газу 17,7 %.

Ключові слова: кільцева піч, природний газ, технологічний кисень, збагачене повітря, економія палива

With the use of the worked out mathematical model thermal work of circular furnace at enriching of burning air by technological oxygen (from 21 to 37 %) for two variants of oxygen mixing with atmospheric air are researched. It is set that organization of mixing does not render substantial influence on the factors of furnace thermal work. The maximal economy of fuel is arrived at maintenance of oxygen in air 37 % and makes 19,5 and 20,1 %, respectively, for the first and second variants. At a limit on the maximal expense of oxygen (2000 m³/hour) its content in air is 33,6 %, and realization of measure provides the economy of natural gas 17,7 %.

Keywords: circular furnace, natural gas, industrial oxygen, enriched air, fuel economy

Вступ. Кільцеві печі застосовують на металургійних підприємствах для нагрівання трубних та колісних заготовок перед обробкою тиском і, зазвичай, опалюють природним газом. Мінімізація витрат на паливо шляхом підвищення енергоефективності печей дає змогу збільшити конкурентоздатність продукції, значну частину якої експортують. Особливої актуальності питання підвищення енергоефективності набувають в умовах постійно зростаючих цін на природний газ, а також значної залежності України від зовнішніх постачальників.

У теперішній час для вітчизняної металургії характерно зниження обсягів виробництва за умов якого підприємства часто мають надлишки власних енергоресурсів, у тому числі технологічного кисню. Такі надлишки часто залишаються не використаними, або використовуються не ефективно. В той же час одним із відомих захо-

дів підвищення енергоефективності нагрівальних пристроїв є використання технологічного кисню для збагачення повітря горіння [1,2]. Збільшення вмісту кисню у повітрі призводить до зменшення баласту (азоту), а, отже, і питомого виходу димових газів, в результаті чого знижуються теплові втрати печі з відхідними димовими газами. Також збільшуються коефіцієнт використання теплоти палива (КВТ), коефіцієнт корисної дії печі (ККД) та калориметрична температура горіння палива, які впливають на показники теплової роботи печі так само як і підвищення температури підігрівання повітря.

У роботах [3-6] досліджено економію палива в теплових агрегатах металургійних підприємств за вмістом кисню у повітрі в діапазоні 21...100 %. Показано, що максимальна економія палива у нагрівальних печах не перевищує 55...58 % і досягається переведенням печі на «паливно-кисневу технологію» його спалювання. На практиці вміст кисню у повітрі можна

обмежити 45...50 %, оскільки подальше збагачення повітря не призводить до значного зростання економії палива. Також автори робіт відзначають, що ефективність збагачення повітря киснем залежить від технічного стану та особливостей конструкції теплового агрегату та його допоміжного обладнання, а під час розрахунків економічного ефекту від впровадження заходу необхідно звертати увагу на вартість кисню, що відрізняється в 3,5 рази залежно від технології його виробництва. За даними роботи [2] витрати електроенергії на його виробництво складають від 330 до 1150 кВт·год./тис. м³ кисню.

Метою даної роботи є дослідження ефективності використання технологічного кисню для збагачення повітря горіння у кільцевій печі за умови дотримання заданої продуктивності та наявності обмеження на максимальну витрату кисню.

Характеристика об'єкта дослідження. Як об'єкт дослідження вибрано кільцеву піч для нагрівання трубних заготовок діаметром 0,57 і довжиною 1,90 м перед прошивним пресом до кінцевої температури поверхні 1270 °С з перепадом температур за товщиною заготовки 30 °С. За максимальної продуктивності 60 т/год. піч працює за двоохонним температурним режимом. Посад заготовок у піч – двоохрядний, кількість заготовок у печі – 100 шт. Основні розміри її робочої камери: середній діаметр – 24,0 м; ширина поду – 4,9 м; висота – 2,04 м; кут «мертвої зони» – 22°30', довжина активного поду – 75,36 м. Піч розділена на чотири технологічні зони: три опалювальні та одну методичну. Щодо відношення до активної площі поду технологічні зони складають: методична – 30 %, перша зварювальна – 27 %; друга зварювальна – 23 %; томильна – 20 %. Піч обладнано металевим трубчастим рекуператором, що забезпечує температуру підігрівання повітря до 200...300 °С. Загальна площа поверхні теплообміну рекуператора становить 200 м².

Піч опалюють природним газом за допомогою 55 пальників типу «труба в трубі», з яких 35 розташовано в стінах зовнішнього кільця та 20 – у стінах внутрішнього кільця. Пропускна здатність кожного пальника щодо газу складає 75 м³/год.

Методика дослідження. Розроблено математичну модель теплової роботи кільцевої печі, де, залежно від прийнятих вихідних даних, можна реалізовувати нагрівання металу за двоох-, трьох- або багатозонним температурним режимом. Під час математичного моделювання, за

методиками, наведеними у роботах [7-9], послідовно виконують наступні розрахунки:

- горіння палива з визначенням теоретичної і дійсної витрати повітря, питомого виходу продуктів згоряння, складу димових газів та їх калориметричної температури горіння, залежності ентальпії диму від температури;

- параметрів зовнішнього теплообміну з визначенням приведених коефіцієнтів випромінювання для систем «газ – кладка - метал», «піч – кладка - метал» і «кладка - метал»;

- нагрівання металу, під час якого визначають змінювання характерних температур металу, димових газів і футерівки печі;

- теплових втрат печі, витрат палива на кожну зону, загального та зональних теплових балансів печі, техніко-економічних показників її роботи;

- підігрівання повітря в металевому рекуператорі, під час якого визначають температуру димових газів за рекуператором та температуру підігрівання повітря.

Результати дослідження. З використанням математичної моделі досліджено нагрівання металу в кільцевій печі, що працює на атмосферному та збагаченому киснем повітрі за максимальної продуктивності 60 т/год. Під час розрахунків прийнято, що за використанням для спалювання палива атмосферного повітря у печі застосовують двоохонний температурний режим нагрівання металу. Для забезпечення продуктивності печі на максимальному рівні (60 т/год.) за використанням для спалювання палива повітря, збагаченого киснем, передбачено корегування її температурного режиму з переходом на трьох- або багатозонний температурний режим нагрівання металу.

Також розглянуто два варіанти змішування атмосферного повітря з технологічним киснем. Згідно першому варіанту (далі Варіант 1) атмосферне повітря, що підігріто у рекуператорі, змішують з технологічним киснем перед піччю. За другим варіантом (далі Варіант 2) спочатку здійснюють змішування атмосферного повітря та кисню, а потім збагачене повітря підігрівають у рекуператорі. Розрахунки виконано для обох варіантів для часток кисню у повітрі горіння 0,21...0,37.

Як показали дослідження теплової роботи кільцевої печі, під час використання для спалювання палива атмосферного повітря нагрівання металу до заданих кінцевих параметрів відбувається за витрати природного газу 2360 м³/год. (або 39,34 м³/т металу); тривалість нагрівання складає 6,3 год. Пропускна здатність пальнико-

вих пристроїв, якими обладнано піч, та їх кількість є достатніми для забезпечення розрахованої загальної теплової потужності печі 23,29 МВт. Температура димових газів на виході з печі складає 800 °С, що забезпечує нагрівання атмосферного повітря в рекуператорі до температури 300 °С.

Результати дослідження змінювання складу продуктів згоряння та параметрів зовнішнього теплообміну в печі під час збагачення повітря технологічним киснем наведено на рис. 1, а також у табл. 1 і 2. Видно, що за змінюванням частки кисню в повітрі горіння з 0,21 до 0,37 питома витрата димових газів зменшується з 11,38 до 6,90 м³/м³, тобто на 39 %. В той же час об'ємний відсоток газів-випромінювачів у складі димових газів зростає з 25,96 до 42,79 %. Це обумовлює зменшення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією від димових газів до металу, а також зростання коефіцієнта випромінювання системи «газ - кладка - метал» на 19...26 % (залежно від температури диму) за рахунок збільшення ступенів чорноти димових газів та системи «газ - кладка -

метал».

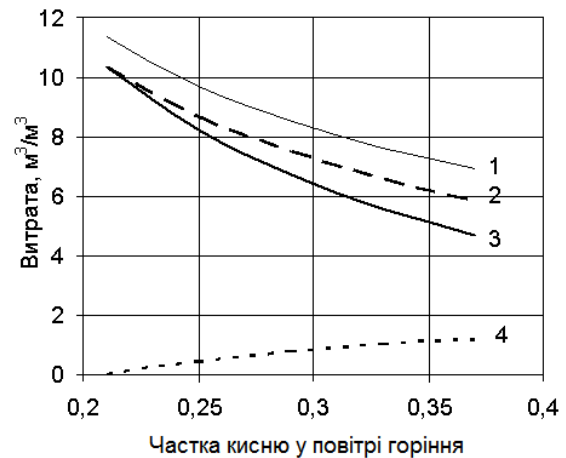


Рисунок 1 – Результати розрахунку горіння палива за $n = 1,1$: 1 - питомий вихід продуктів згоряння, м³/м³; 2 - дійсна витрата збагаченого повітря м³/м³; 3 - дійсна витрата атмосферного повітря, м³/м³; 4 - дійсна витрата технологічного кисню, м³/м³

Таблиця 1 – Вміст газів-випромінювачів у складі продуктів згоряння палива в залежності від частки кисню у повітрі горіння

Газ-випромінювач	Частка кисню у повітрі горіння				
	0,21	0,25	0,29	0,33	0,37
CO ₂ , об'ємні відсотки	8,85	10,36	11,81	13,22	14,59
H ₂ O, об'ємні відсотки	17,11	20,03	22,84	25,57	28,20
Загальний об'ємний відсоток газів-випромінювачів	25,96	30,39	34,65	38,79	42,79

Таблиця 2 – Змінювання параметрів зовнішнього теплообміну залежно від збагачення киснем повітря та температури продуктів згоряння за температури 500, 900 и 1300 °С

Частка кисню у повітрі горіння	Ступінь чорноти димових газів			Ступінь чорноти системи «газ - кладка - метал»			Коефіцієнт випромінювання системи «газ - кладка - метал», Вт/(м ² ·К ⁴)		
	500	900	1300	500	900	1300	500	900	1300
0,21	0,310	0,2527	0,191	0,473	0,417	0,345	2,681	2,363	1,954
0,25	0,342	0,280	0,212	0,501	0,445	0,372	2,849	2,522	2,106
0,29	0,372	0,306	0,233	0,525	0,469	0,395	2,975	2,660	2,241
0,33	0,400	0,33	0,252	0,546	0,491	0,417	3,093	2,782	2,361
0,37	0,426	0,353	0,271	0,564	0,510	0,436	3,197	2,890	2,470

В зв'язку з невисокою швидкістю руху димових газів у робочій камері кільцевої печі конвективна складова теплообміну суттєво не впливає на кінцеві результати процесу нагрівання металу та під час виконання досліджень, згідно рекомендацій роботи [10], нею можна знехтувати, що і передбачено методикою розрахунків. В той же час, збільшення коефіцієнтів випромінювання системи «газ - кладка - метал» за збагаченням повітря киснем обумовлює інтенсифікацію теплообміну в робочому обсязі печі, що призводить до необхідності незначного корегу-

вання її температурного режиму з метою забезпечення потрібної продуктивності (60 т/год.).

Результати розрахунків теплової роботи печі для розглянутих варіантів змішування атмосферного повітря з технологічним киснем наведено на рис. 2, 3 і табл. 3. Видно, що для діапазону змінювання частки кисню у повітрі горіння від 0,21 до 0,37 спосіб організації змішування мало впливає на показники роботи печі та рекуперативного теплообмінника. Так, за однакової частки кисню у повітрі горіння, під час реалізації Варіанту 2 температура продуктів згоряння,

що відходять з печі, на 5...14 °С нижча, ніж під час реалізації Варіанту 1. Проте, оскільки за Варіантом 1, атмосферне повітря, підігрите в рекуператорі (температуру якого позначено цифрою 1 на рис. 3), змішується з холодним технологічним киснем, то кінцева температура повітря горіння, яке подають до пальників, на 7...31 °С нижча, ніж за Варіантом 2. Таким чином, реалізація Варіанту 2 забезпечує декілька вищій кое-

фіцієнт використання теплоти палива та більшу економію природного газу, ніж реалізація Варіанту 1 (див. табл. 3). Максимальна економія палива досягається за частки кисню у повітрі 0,37 і складає 19,5 та 20,1 % відповідно для Варіантів 1 та 2. Питома економія природного газу досягає 7,67 м³/т у Варіанті 1 та 7,89 м³/т у Варіанті 2 за відповідної питомої витрати технологічного кисню 37,66 та 37,4 м³/т.

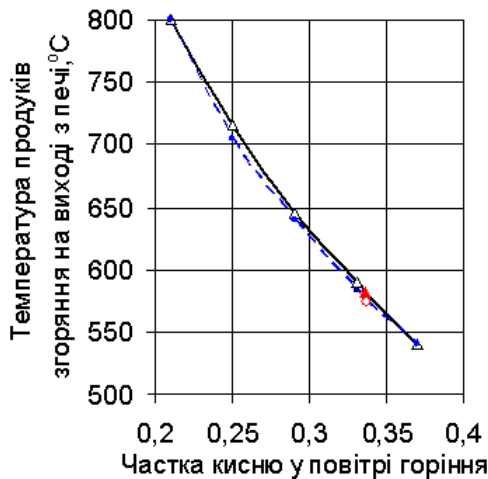


Рисунок 2 – Температура продуктів згоряння на виході з печі. Суцільні лінії - Варіант 1; пунктирні лінії - Варіант 2

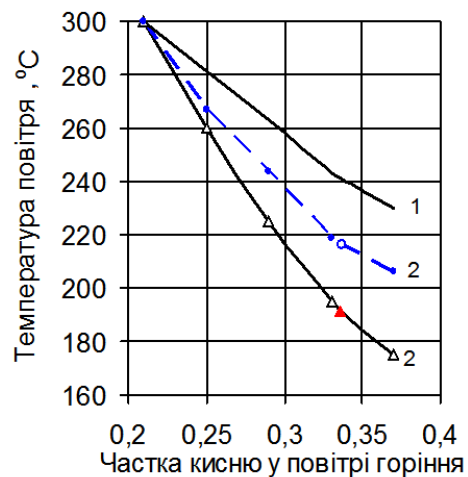


Рисунок 3 – Температура підігрівання повітря. Суцільні лінії - Варіант 1, пунктирні - Варіант 2. 1- температура атмосферного повітря за рекуператором; 2 – температура збагаченого повітря перед піччю

Таблиця 3 – Показники теплової роботи печі

Частка кисню у повітрі горіння	Коефіцієнт використання теплоти палива		Питома витрата технологічного кисню, м ³ /т		Питома витрата палива, м ³ /т		Економія палива, %	
	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 1	Варіант 2
0,25	0,786	0,792	15,80	15,68	35,91	35,65	8,7	9,4
0,29	0,831	0,836	25,65	25,48	33,81	33,57	14,0	14,6
0,33	0,860	0,868	32,55	32,28	32,54	32,27	17,3	18,0
0,37	0,881	0,887	37,66	37,40	31,66	31,44	19,5	20,1

Якщо надлишок технологічного кисню на підприємстві є обмеженим і, наприклад, складає 2000 м³/год, то залежно від способу змішування досягають різного ступеня збагачення повітря горіння. Так, у Варіанті 1 вміст кисню в повітрі горіння складає 33,56 %, а у Варіанті 2 – 33,74 %.

Порівняння показників теплової роботи печі та досягнутих показників енергоспоживання подано у табл. 4. Розрахунки виконано за цінами природного газу та технологічного кисню, відповідно, 9005,32 грн./тис. м³ та 750 грн./тис.

м³ для фактичного обсягу виробництва 262,8 тис. т/рік.

Зниження витрат на паливо (див. табл. 4), розраховують за формулою:

$$\Delta C = C_{n_2} \cdot b_{n_2} - C_{O_2} \cdot b_{O_2}, \quad (1)$$

де C_{n_2} , C_{O_2} – ціна природного газу та технологічного кисню, грн./тис. м³, відповідно; b_{n_2} , b_{O_2} – питомі економія природного газу та витрата технологічного кисню, м³/т, відповідно.

Таблиця 4 – Показники теплової роботи печі під час використання для спалювання палива атмосферного та збагаченого киснем повітря

Показник	Робота на атмосферному повітрі	Робота на збагаченому повітрі	
		Варіант 1	Варіант 2
Температура підігрівання повітря у рекуператорі, °С	300	241	216
Температура технологічного кисню, °С	-	0	216
Температура збагаченого повітря перед піччю, °С	300	191	216
Температури диму, що відходить з печі, °С	800	582	520
Частка кисню у повітрі горіння	0,21	0,3356	0,3374
Часова витрата атмосферного повітря, м ³ /год	24426	10585	10405
Часова витрата технологічного кисню, м ³ /год	0	2000	2000
Часова витрата палива, м ³ /год	2360	1943	1926
Вихід димових газів, м ³ /год	26859	14587	14389
Питома витрата палива, м ³ /т	39,33	32,38	32,10
Загальна теплова потужність печі, МВт	23,29	19,17	19,01
Коефіцієнт використання теплоти палива	0,722	0,864	0,872
Коефіцієнт корисної дії печі, %	62,6	76,1	76,7
Коефіцієнт рекуперації теплоти	0,268	0,251	0,282
Економія природного газу, %	-	17,7	18,4
Питома економія природного газу, м ³ /т	-	6,95	7,23
Питома витрата технологічного кисню, м ³ /т	-	33,33	33,33
Зниження витрат на нагрівання металу, грн/т	-	37,59	40,11
Річний економічний ефекти, тис. грн/рік	-	9878,652	10540,91
Ціна технологічного кисню, що забезпечує безбитковість його використання у кільцевій печі, грн/тис. м ³	-	1877,80	1953,45

За умов, коли ціна природного газу є високою та має тенденцію до подальшого зростання, а технологічний кисень є власним енергоресурсом підприємства, для стимулювання споживання його надлишків, що утворюються завдяки змінюванню продуктивності основних металургійних агрегатів, доцільно визначати максимальну вартість технологічного кисню та встановлювати його відпускну ціну, спираючись на цей показник та собівартість його виробництва. Для печі, що розглядають, максимальну вартість кисню, за якої його використання є економічно виправданим без урахування витрат на впровадження заходу, можна визначити з рівняння (1) за умови, що $\Delta C = 0$:

$$C_{O_{2max}} = \frac{C_{nz} \cdot b_{nz}}{b_{O_2}} \quad (2)$$

Як видно з табл. 4, обидва розглянуті варіанти організації змішування технологічного кисню з атмосферним повітрям є економічно виправданими. Проте, слід зауважити, що під час виконання досліджень металевий рекуператор було прийнято газошільним. Практика експлуатації нагрівальних пристроїв свідчить, що так відбувається не завжди. В процесі експлуатації під час перевищення тимчасових теплових навантажень печі та відсутності ефективної системи захисту теплообмінника від перегрівання, реку-

ператор, у деяких випадках, втрачає газошільність через місцеві прогари сталевих трубок. Окрім того, деякі конструкції металевих рекуператорів (наприклад, чавунні голчасті рекуператори або сталеві рекуператори з вертикально розташованими трубками) не є газошільними за особливостями конструкцій, тому незначна перевага, яку має Варіант 2, може бути знеціненою втратами технологічного кисню у рекуператорі за наявності витоку збагаченого повітря під час його підігрівання.

Переведення кільцевої печі на роботу на збагаченому киснем повітрі потребує обладнання її додатковим трубопроводом для підведення кисню та реконструкції автоматичної системи управління тепловою роботою печі. Окрім того, слід відзначити, що завдяки суттєвій економії палива під час впровадження заходу (17,7... 18,4 % залежно від вибраного способу організації змішування кисню та атмосферного повітря) суттєво зменшується діапазон регулювання теплової потужності пальникових пристроїв, якими обладнано піч. Тому, для печей, які працюють у широкому діапазоні змінювання продуктивності, під час впровадження заходу необхідно додатково розробити енергоефективні режими нагрівання металу. Не зважаючи на складнощі з попередньою оцінкою капітальних витрат на реконструкцію печі, обумовленою тим, що проектні,

монтажні та налагоджувальні роботи виконують за договірними цінами, а вибирання виконавця робіт здійснюють на тендерній основі, розрахований економічний ефект від впровадження заходу на рівні 9,9...10,5 млн. грн./рік дає підставу стверджувати, що термін його окупності не перевищуватиме одного року.

Висновки. Досліджено теплову роботу кільцевої печі, яка працює на атмосферному та збагаченому киснем повітрі у діапазоні змінювання концентрації кисню в повітрі горіння від 21 до 37 %. Розглянуто два варіанти організації змішування атмосферного повітря з технологічним киснем. Визначено, що організація змішування суттєво не впливає на показники теплової робо-

ти печі. Значення максимальної економії палива досягають за максимальної частки кисню у повітрі (0,37), яка становить 19,5 та 20,1 %, відповідно, для варіантів 1 та 2. Проте, зважаючи на особливості технічного стану та конструкції рекуператорів, якими обладнують печі, доцільним є змішування підігрітого атмосферного повітря з холодним киснем після рекуператора. В умовах, коли витрата технологічного кисню є обмеженою (2000 м³/год,) а змішування підігрітого атмосферного повітря з киснем відбувається після рекуператора, реалізація заходу забезпечує економію палива 17,7 % за вмістом кисню в збагаченому повітрі 33,56 %.

Бібліографічний список

1. **Ревун, М. П.** Высокотемпературные теплотехнические процессы и установки в металлургии [Текст] / М. П. Ревун, Б. Б. Потапов, В. М. Ольшанский, А. В. Бородулин. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2002. – 443 с. – Библиогр.: с. 436-438. – 300 экз. – ISBN 966-701-41-X.
2. **Карп, И. Н.** Использование кислорода и обогащенного кислородом воздуха в нагревательных печах, колодах, стендах разогрева сталеразливочных ковшей [Текст] / И. Н. Карп, А. Н. Зайвый, Е. П. Марцевой, К. Е. Пьяных // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – № 3. – С. 18-29. – Библиогр.: с. 29.
3. **Кабишов, С. М.** Интенсификация тепловых процессов в высокотемпературных установках на примере нагревательных печей ОАО «БМЗ» путем обогащения воздуха воздушной смеси кислородом [Текст] / С. М. Кабишов, И. А. Трусова, П. Э. Ратников, Д. В. Менделев // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (67). – С. 218-221. – Библиогр.: с. 221.
4. **Менделев, Д. В.** Экономические аспекты обогащения воздушного дутья кислородом в нагревательных и термических печах / Д. В. Менделев, С. М. Кабишов, И. А. Трусова и др. [Текст] // Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск: БНТУ, 2014. – Вып. 35. – С. 8-16. – Библиогр.: с. 16.
5. **Гупало, Е. В.** Использование технологического кислорода в нагревательных печах трубопрокатного цеха [Текст] / Е. В. Гупало, А. С. Стромченко, В. В. Яшний // Металургія : Збірник наукових праць Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : ЗДІА, 2016. – Вип. 1 (35). – С. 84-87. – Библиогр.: с. 87.
6. **Гупало, Е. В.** Эффективность использования излишков технологического кислорода для экономии топлива на металлургическом заводе [Текст] / Е. В. Гупало, Д. С. Пономаренко, В. В. Романько // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції ; у 3-х частинах. – м. Суми, 19-23ю04.2010 р. – Суми : Вид-во СумДУ, 2010. – Ч. III. – С. 93-94. – Библиогр.: с. 94.
7. **Губинский, В. И.** Металлургические печи. Теория и расчеты [Текст] / В. И. Губинский, В. И. Тимошпольский, В. М. Ольшанский и др. ; под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского ; в 2-х т. – Минск : Белорусская наука, 2007. – Т. 1. – 596 с. – Библиогр.: с. 591-592. – 700 экз. – ISBN 978-985-08-0795-3 (Т. 1), ISBN 978-085-08-3.
8. **Губинский, В. И.** Металлургические печи. Теория и расчеты [Текст] / В. И. Губинский, В. И. Тимошпольский, В. М. Ольшанский и др. ; под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского ; в 2-х т. – Минск : Белорусская наука, 2007. – Т. 2. – 832 с. – 700 экз. – ISBN 978-985-08-0856-1 (Т. 2), ISBN 978-085-08-0794-6.
9. **Тебеньков, Б. П.** Рекуператоры для промышленных печей [Текст] / Б. П. Тебеньков. – М. : Металлургия, 1975. – 296 с. – Библиогр.: с. 286-290. – 4200 экз.
10. **Гупало, О. В.** Удосконалення роботи печей безперервної дії прокатного виробництва з метою енергозбереження [Текст] / О. В. Гупало // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 «Металургія чорних металів». – Дніпропетровськ : НМетАУ, 2005. – 20 с. – 100 прим.

Стаття надійшла до редакції 09.11.2016 р.
Рецензент, проф. М.В. Губинський