



УДК 621.783.22

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE POSITION OF MATERIALS ON THE THERMAL OPERATION OF A HIGH-TEMPERATURE INSTALLATION

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ПОСАДУ МАТЕРІАЛІВ НА ТЕПЛОВУ РОБОТУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ УСТАНОВКИ

Hlushchenko O. / Глущенко О.Л.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-9230-9958

Yemelyanov O. / Ємельянов О.О.

bachelor's degree / бакалавр

Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Dneprostroyevskaia 2, 51918

Дніпровський державний технічний університет,

Кам'янське, Дніпробудівська 2, 51918

Анотація. В роботі проводиться дослідження впливу температури посаду металу на теплову роботу рекуперативного нагрівального колодязя. Дані дослідження дозволяють визначити найбільш енергоефективний режим роботи високотемпературного агрегату, в якому досягається мінімальна витрата палива при його роботі. В результаті проведених досліджень було з'ясовано, що для зіставлення роботи печей з різною температурою посада металу, в якості показника, що характеризує паливовикористання, не можна приймати ККД, а треба використовувати наявний ККД (кількість тепла, яка залишається в робочому просторі печі при мінімально можливій температурі відхідних газів, яка не може бути нижче температури металу), оскільки при нагріванні металу гарячого посаду, ККД виходить нижче, ніж при нагріванні холодного посаду. Це пояснюється тим, що при нагріванні гарячого посаду істотно знижується корисна теплова потужність печі, падає через зменшення температурного напору, в той час як потужність холостого ходу і КВТ змінюються мало.

Ключові слова: рекуперативний нагрівальний колодязь, робоча камера, високотемпературний нагрів, корисне тепловикористання, наявний коефіцієнт корисної дії, гарячий та холодний посад, корисна теплова потужність печі.

Вступ.

Нагрівальні печі й колодязі є найбільшими споживачами палива. Вони займають третє місце (10-15%) після доменного та сталеплавильного виробництв за споживанням теплової енергії у чорній металургії. Проте корисне тепловикористання в промислових печах України залишається незадовільним, складаючи 30-40 %.

При незмінних розмірах робочого простору нагрівальних колодязів, сортаменті й технологічних параметрах сталей, підвищення ефективності нагріву металу можливо за рахунок удосконалення системи опалення і окремих конструктивних елементів, а також оптимізації режимів роботи колодязів.

Вирішувати ці питання необхідно з урахуванням зростаючих вимог до якості готової продукції. Щодо нагрівальних колодязів це означає рішення проблеми відповідності полів температури нагрівального середовища і виробів, що нагріваються, за умов рівномірності і максимально припустимої інтенсивності зовнішнього теплообміну. Тому підвищення ефективності використання нагрівальних печей у металургійному виробництві є задачею



складною, рішення якої можливо при проведенні комплексних досліджень теоретичними й експериментальними методами.

Постановка задачі.

Нагрівальна піч - піч для нагрівання твердих матеріалів з метою підвищення пластичності або зміни структури цих матеріалів. Це найпоширеніший клас печей, оскільки широко застосовуються не тільки в чорній металургії, а й в кольоровій металургії, в машинобудуванні і т.п.

В даній роботі розглядається теплова робота рекуперативного нагрівального колодязя з опаленням з центру подини - нагрівальний колодязь, в якому повітря підігрівається в рекуператорі, а підведення газу і повітря здійснюється через отвори в подині.

Не дивлячись на певні переваги, рекуперативні нагрівальні колодязі мають і ряд недоліків [1 - 3]:

а) нерівномірність нагріву злитка по висоті в зв'язку з недостатньо хорошим перемішуванням газу і повітря перед спалюванням;

б) тривалість нагріву злитків холодного посаду і питома витрата палива трохи вище, ніж у регенеративних нагрівальних колодязях і при цьому колодязі вимагають більш калорійного палива;

в) порушення герметичності рекуператора в процесі його експлуатації, що призведе до втрат повітря.

Відомо, що питома витрата умовного палива залежить від температури посаду зливків.

Отже, за допомогою теплового розрахунку нагрівального колодязя з'ясуємо найбільш енергоефективний режиму роботи щодо кількості палива, що спалюється, оскільки саме теплотехнічний розрахунок дає можливість визначити техніко-економічні показники роботи агрегату.

Результати роботи.

Проводимо теплотехнічний розрахунок рекуперативного нагрівального колодязя за відомими методиками, представленими в [4, 5]. Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку

Назва величини	Одиниці виміру	Значення величини
1. Розміри зливків	мм	700×750×2000
2. Кількість зливків	шт.	10
3. Марка сталі	-	Ст 10 кп
4. Початкова температура зливків $t_{n,n}$	°C	20
5. Кінцева температура поверхні зливків $t_{n,k}$	°C	1250
6. Кінцева різниця температур по перерізу зливків Δt_k	°C	60
7. Вид палива	природно – доменна суміш	
8. Нижча теплота згорання палива Q^p	МДж/м ³	8,2

Результати теплотехнічного розрахунку рекуперативного нагрівального колодязя представлені у таблиці 2.



Таблиця 2 – Результати теплотехнічного розрахунку

Назва величини	Одиниці виміру	Значення величини
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
1. Дійсна витрата повітря при коефіцієнті витрати повітря $n=1,1, L_{\delta}$	м ³ /м ³	1,8
2. Вихід продуктів згорання, V_{δ}	м ³ /м ³	2,636
3. Калориметрична ентальпія продуктів згорання при холодному газі і повітрі, $i^{\circ}_{кал}$	кДж/м ³	3111
4. Уточнене значення калориметричної температури, $t^{\#}$	°С	1869
5. Ширина робочої камери нагрівального колодязя, B	м	3,75
6. Довжина робочої камери, L	м	4,55
7. Площа поду камери нагрівального колодязя, $F_{под}$	м ²	17,06
8. Об'єм камери колодязя, $V_{к}$	м ³	47,77
9. Об'єм газів, що заповнюють робочу камеру, V_2	м ³	37,27
10. Температура печі в кінці нагріву, $t_{печ.к.}$	°С	1275
Розрахунок першого періоду нагріву ($M = const$)		
11. Оптимальний питомий тепловий потік на початку нагріву, q_{optn}	Вт/м ²	81722
12. Температуру печі на початку нагріву, $t_{печ.n}$	°С	1031
13. Коефіцієнт використання тепла на початку нагріву, η_n	-	0,61
14. Питома робоча теплова потужність, m_0	Вт/м ²	133970
15. Температура поверхні зливка наприкінці першого періоду нагріву, $t_{n.к1}$	°С	1064
16. Температура центра зливка, $\Delta t_{к1}^*$	°С	706
17. Середньомасова температура зливка наприкінці першого періоду нагріву, $\bar{t}_{мк1}$	°С	888
18. Середній питомий тепловий потік у першому періоді, \bar{q}_1	Вт/м ²	77100
19. Тривалість першого періоду нагріву за режимом $M=const$, τ_1	год.	3,503
Розрахунок другого періоду нагріву ($t_{нич} = const$)		
20. Температура центра зливка, $\Delta t_{цк2}^*$	°С	1040
21. Тривалість першого інтервалу нагріву при $t_{печ}=const$, τ_2	год.	1,73
22. Тривалість другого інтервалу нагріву при $t_{печ}=const$, τ_3	год.	1,35
23. Середньомасова температура зливка наприкінці другого періоду нагріву, $\bar{t}_{мк3}$	°С	1222
24. Загальна тривалість комбінованого режиму нагріву злитка, $\tau_{заг}$	год.	6,58
25. Тривалість початкового інерційного періоду, τ'	с	0,341
26. Питомий тепловий потік в кінці інерційного періоду, q'	Вт/м ²	80821



1	2	3
27. Температура поверхні зливка в кінці інерційного періоду, t'_n	°C	295
28. Середньомасова температура зливка в кінці інерційного періоду, \bar{t}'_m	°C	168
29. Температура печі в кінці інерційного періоду, $t'_{печ}$	°C	1036
30. Температура диму в кінці інерційного періоду, t'_d	°C	1180
31. Температура кладки в кінці інерційного періоду, $t'_{кл}$	°C	878
32. Температура кладки на початку нагріву за режимом $M=const$, $t_{кл.п}$	°C	865
33. Температура кладки в кінці нагріву за режимом $M=const$, $t_{кл.1}$	°C	1197
34. Температуру кладки в кінці першого інтервалу нагріву за режимом $t_{печ} = const$, $t_{кл.2}$	°C	1246
35. Температуру кладки наприкінці нагріву за режимом $t_{печ} = const$, $t_{кл.3}$	°C	1265
36. Середня температура диму за перший період нагріву при $M=const$, \bar{t}_d	°C	1284
37. Уточнена температура підігріву повітря у першому періоді нагріву ($M=const$), $\bar{t}_{нов1}^*$	°C	855
38. Коефіцієнт теплопередачі для кладки стін і поду, K_1	Вт/м ² ·°C	1,23
39. Коефіцієнт теплопередачі К для кришки нагрівального колодязя, K_2	Вт/м ² ·°C	2,75
40. Зовнішня поверхня бокових стін нагрівального колодязя, $F_{ст}$	м ²	78,46
41. Поверхня поду камери, $F_{под}$	м ²	30,98
42. Поверхня кришки робочої камери, $F_{кл}$	м ²	20,54
43. Теплові втрати через кладку стін і поду, Q'_1	Вт	161130
44. Теплові втрати через кришку, Q''_1	Вт	67612
45. Втрати теплопровідністю через кладку, Q_1	Вт	228700
46. Теплові втрати випромінюванням, Q_2	Вт	166400
47. Потужність холостого ходу наприкінці нагріву за режимом $M=const$, $M_{xx.к1}$	Вт	$2,63 \cdot 10^6$
48. Загальна максимальна теплова потужність камери, $M_{макс}$	кДж/год	$29,18 \cdot 10^6$
49. Максимальна подача газу в камеру, $B_{макс}$	м ³ /год	3635
50. Максимальна подача повітря, $V_{пов.макс}$	м ³ /год	6543
51. Максимальний вихід диму, $V_{d макс}$	м ³ /год	9582



1	2	3
52. Мінімальна робоча теплова потужність колодязь наприкінці нагріву зливків, $M_{p.мін}$	кДж/кг	1076765
53. Значення КВТ наприкінці процесу нагріву зливків, η_k	-	0,575
54. Мінімальна загальна теплова потужність наприкінці нагріву зливків, $M_{мін}$	кДж/год	$6,51 \cdot 10^6$
55. Витрата палива, $B_{мін}$	м ³ /год	794
56. Витрати повітря, $V_{пов.мін}$	м ³ /год	1429
57. Вихід диму, $V_{д.мін}$	м ³ /год	3767
58. Ємність камери, E	кг	81900
59. Теплотехнічна продуктивність колодязя, $P_{тепл}$	т/год	12,4
60. Середня засвоєна металом теплова потужність, \bar{M}_z	Вт	$2,86 \cdot 10^6$
61. КВТ від окислення заліза, η_{Fe}	-	0,694
62. ККД печі за теплом палива, η	-	0,485
63. Витрати умовного палива на одну тону зливків, v	кДж/т	52,2

Для того, щоб з'ясувати, яким чином впливає температура посаду зливків на теплову роботу рекуперативного нагрівального колодязя, зробимо аналогічний розрахунок, з тими ж вихідними даними, тільки початкову температуру зливків приймемо $t_{п.п} = 0$ °С.

Тепло, що засвоєне металом від окислення заліза:

$$M_{z.м.} = 0,15 \cdot 14891 \cdot 6700 \cdot 0,720 = 1,077 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Середня потужність, засвоєна металом від згоряння палива:

$$\bar{M}_{z.п.} = \bar{M}_z - \bar{M}_{z.м.} \quad (1)$$

$$\bar{M}_{z.п.} = 12,5 \cdot 10^6 - 1,077 \cdot 10^6 = 11,42 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}$$

Середня робоча теплова потужність

$$\bar{M}_p = \frac{\bar{M}_{z.п.}}{\eta}, \quad (2)$$

$$\bar{M}_p = \frac{11,42 \cdot 10^6}{0,67} = 17,04 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}$$

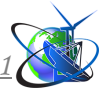
Середня загальна теплова потужність:

$$\bar{M} = \bar{M}_p + \bar{M}_{xx}, \quad (3)$$

$$\bar{M} = 17,04 \cdot 10^6 + 2,83 \cdot 10^6 = 19,87 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Середні витрати газу

$$\bar{B} = \frac{\bar{M}}{Q_n^p}, \quad (4)$$



$$\bar{V} = \frac{19,87 \cdot 10^6}{9200} = 2160 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

Коефіцієнт корисної дії печі за теплом палива

$$\eta = \frac{\bar{M}_{з.п.}}{\bar{M}}, \quad (5)$$

$$\eta = \frac{11,42 \cdot 10^6}{19,87 \cdot 10^6} = 0,574 \text{ або } 57 \%$$

Результати розрахунку теплового балансу зводимо у таблицю 3 та 4, відповідно.

Таблиця 3 - Тепловий баланс робочої камери за весь процес нагріву зливків

Статті	Прибуток тепла	Статті	Витрати тепла
	10^6 кДж		10^6 кДж
Згоряння палива	204	Тепло нагрітого металу	68,2
Окислення заліза	9,88	Тепло окалини	1,5
Фізичне тепло повітря для згоряння палива	39,5	Теплові втрати робочої камери	12,5
Фізичне тепло повітря для згоряння палива	0,7	Тепло продуктів згоряння палива	168,9
		Тепло азоту від окислення заліза	11
Усього:	254,06	Усього:	253,2

$$\text{Нев'язка : } \frac{254,06 - 253,2}{254,06} \cdot 100\% = 0,7\%$$

Таблиця 4 – Тепловий баланс печі в цілому

Статті	Прибуток тепла	Статті	Витрати тепла
	10^6 кДж		10^6 кДж
Згоряння палива	204	Тепло металу	68,2
Окислення заліза	9,88	Тепло окалини	1,5
Від повітря при 0 °С	-	Теплові втрати камери	12,5
Від газу при 0 °С	-	Тепло, що виноситься у димову трубу:	
		- продуктами згоряння палива, - азотом повітря, витраченого на окислення заліза	128,5 0,31
Усього:	213,88	Усього:	211,01

$$\text{Нев'язка : } \frac{213,88 - 211,01}{213,88} \cdot 100\% = 1,3\%$$



Проведені розрахунки показують, що при нагріванні металу гарячого посаду, ККД виходить нижче, ніж при нагріванні холодного посаду. Таким чином, створюється враження, що піч працює менш економічно, в той час як питома витрата тепла на одиницю продукції (b) нижче, ніж при холодному посаді. Це пояснюється тим, що при нагріванні гарячого посаду істотно знижується корисна теплова потужність печі, ($q \cdot F / \eta$) падає через зменшення температурного напору, в той час як потужність холостого ходу і КВТ змінюються мало.

Раніше було отримано, що

$$\text{ККД} = \frac{\eta}{1 + \frac{\sum Q_{\text{втр.}}}{G \cdot \Delta i}} \quad (6)$$

Цей вираз можна привести до вигляду:

$$\text{ККД} = \frac{\eta}{1 + \frac{M_{\text{х.х.}}}{M_{\text{кор.}}}} \quad (7)$$

З цього виразу видно, що при однаковому КВТ і $M_{\text{х.х.}}$ зі збільшенням температури посаду, тобто зі зменшенням $M_{\text{кор.}}$, ККД знижується.

Таким чином, для зіставлення роботи печей з різною температурою посада металу ККД не можна приймати в якості показника, що характеризує паливовикористання.

У цьому випадку доцільно користуватися поняттям наявного ККД, який дорівнює

$$\text{ККД}_{\text{наяв.}} = \frac{G \cdot \Delta i}{Q_{\text{наяв.}}} \quad (8)$$

Під наявним теплом слід розуміти кількість тепла, яка залишається в робочому просторі печі при мінімально можливій температурі відхідних газів, яка не може бути нижче температури металу t_0 .

$$Q_{\text{наяв.}} = V \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}} - V \cdot \varrho_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}} \cdot t_0 = M_0 - V \cdot \varrho_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}} \cdot t_0 \quad (9)$$

$$\text{ККД}_{\text{наяв.}} = \frac{G \cdot \Delta i}{M_0 - V \cdot \varrho_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}} \cdot t_0} \quad (10)$$

З цього виразу видно, що при холодному посаді металу рівняння (10) перетвориться на рівняння (7)

$$\text{ККД}_{\text{наяв.}} = \frac{\text{ККД}}{1 - \frac{V \cdot \varrho_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}} \cdot t_0}{M_0}} \quad (11)$$

Отже, визначаємо $\text{ККД}_{\text{наяв.}}$

Для злитків гарячого посаду

$$\text{ККД}_{\text{наяв.}} = \frac{0,485}{1 - \frac{2311 \cdot 2,636 \cdot 1,664 \cdot 20}{18,95 \cdot 10^6}} = 0,490 = 49 \%$$



Для злитків холодного посаду

$$\text{ККД}_{\text{наяв.}} = \frac{0,574}{1 - \frac{3535 \cdot 3.23 \cdot 1,639 \cdot 0}{32.53 \cdot 10^6}} = 0,574 = 57,4 \%$$

Заключення та висновки.

1. Проведені дослідження показують, що при нагріванні металу гарячого посаду, ККД виходить нижче, ніж при нагріванні холодного посаду. Це пояснюється тим, що при нагріванні гарячого посаду істотно знижується корисна теплова потужність печі, падає через зменшення температурного напору, в той час як потужність холостого ходу і КВТ змінюються мало.

2. В результаті проведених досліджень було з'ясовано, що для зіставлення роботи печей з різною температурою посада металу, в якості показника, що характеризує паливовикористання, треба використовувати наявний ККД. Саме його значення і було розраховано у даній роботі. В результаті було отримано, що при холодному посаді наявний ККД буде дорівнювати 57,4 %, а при гарячому посаді – 49 %.

Література:

1. Ткаченко О.О. Високотемпературні процеси та установки : підручник / О.О. Ткаченко. – К.: А.С.К., 2005. – 480 с.
2. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки в металлургии: учебное пособие / М.П. Ревун [и др.]. - Запорожье: ЗГИА.- 2002. - 304 с.
3. Свинолобов Н.П. Печи чёрной металлургии: учебное пособие для вузов / Н.П. Свинолобов, В.Л. Бровкин. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 154 с.
4. Расчёты нагревательных печей / С.И. Аверин, Э.М. Гольдфарб, А.Ф. Кравцов [и др.]; под. ред. Н.Ю. Тайца. - К.: Техніка, 1969. – 540 с.
5. Металлургические печи. Теория и расчёты: учебник в 2 т. / В.И. Губинский, В.И. Тимошпольский, В.М. Ольшанский [и др.]; под. общ. Ред.. В.И. Тимошпольского. – Минск: Белорус. Наука, 2007. – 569 с.

Abstract. The study of the influence of the temperature of the metal position on the thermal work of the recuperative heating well is carried out. These studies allow us to determine the most energy-efficient mode of operation of the high-temperature unit, which achieves the minimum fuel consumption during its operation. As a result of research, it was found that to compare the operation of furnaces with different temperatures, the position of the metal, as an indicator of fuel use, can not take efficiency, but should use the available efficiency (amount of heat remaining in the furnace possible exhaust gas temperature, which cannot be lower than the metal temperature), because when heating the metal of the hot position, the efficiency is lower than when heating the cold position. This is due to the fact that when heating the hot position significantly reduces the useful heat output of the furnace, decreases due to the decrease in temperature pressure, while the idle power and HF change little.

Keywords: recuperative heating well, working chamber, high-temperature heating, useful heat use, available efficiency, hot and cold positions, useful thermal power of the furnace.

Стаття відправлена: 29.05.2022р.

© Глуценко О.Л.