

УДК 536.2

Ю. М. Радченко¹, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0002-5055-6707

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

О. А. Ребриков², майстер нагрівальних колодязів

М. О. Шгацький¹, студент

¹ Український державний університет науки і технологій

² ПрАТ «ДМЗ»

ВИБІР ПОЧАТКОВОЇ ТЕПЛОВОЇ ПОТУЖНОСТІ НАГРІВАЛЬНОГО КОЛОДЯЗЯ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОЇ РОБОТИ ПІДПРИЄМСТВА

Анотація. Роботу присвячено пошуку шляхів покращення теплотехнічних показників рекуперативних нагрівальних колодязів при роботі в сучасних умовах, для яких характерна непередбачуваність із забезпеченістю металургійного заводу паливно-енергетичними ресурсами, відсутність сталої виробничої програми, різноманітність виробів, що піддаються тепловій обробці і таке інше. Метою дослідження є визначення раціонального режиму нагрівання зливків (заготовок), який забезпечить мінімум питомої витрати палива при виконанні виробничого замовлення. В якості метода дослідження використано методики розрахунку нагріву металу і показників теплової роботи, які базуються на інженерній теорії нагріву. Інженерна модель розповсюдження теплоти дозволила отримати данні, щодо розподілу температури по перетину заготовки на протязі нагрівання без розв'язання диференційного рівняння теплопровідності, а також розрахувати тривалість окремих періодів нагрівання, теплові втрати робочої камери колодязя до навколишнього середовища. Використання поняття про теплові потужності дозволило визначити основні показники теплової роботи колодязя: продуктивність; питому витрату палива на нагрівання металу; коефіцієнт корисної дії колодязя. В роботі досліджено теплову роботу рекуперативного нагрівального колодязя за типовим режимом нагрівання заготовок: перший період – нагрівання з постійною тепловою потужністю, другий – витримка заготовок при постійній температурі камери колодязя. Визначено, що при нагріванні прямокутних заготовок м'яких марок сталі холодного посаду, мінімум питомої витрати палива на нагрівання металу забезпечує робота колодязя з початковою годинною витратою природного газу 269–398 м³/год. Така тепла потужність колодязя забезпечує прийнятну тривалість нагріву маси металу 29–32 тони на рівні 3,4–4,6 годин. При цьому питома витрата умовного палива складає 48,2 кг/т нагрітого металу.

© 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: нагрівальний колодязь, продуктивність, теплова потужність, питома витрата палива.

Посилання для цитування: Радченко Ю. М., Гупало О. В., Ребриков О. А., Штацький М. О. Вибір початкової теплової потужності нагрівального колодязя в умовах нестабільної роботи підприємства. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 731-740. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-731-740>.

Стан питання. Інтерес до дослідження теплової роботи рекуперативних нагрівальних колодязів останнім часом суттєво знизився, тому публікації з цього питання практично відсутні. Але виробничі потужності, що мають в своєму складі нагрівальні колодязі, до сих пір присутні в металургійній галузі України. В теперішній час умови їх функціонування суттєво змінилися, що знову змушує шукати способи підвищення ефективності їх роботи.

Зараз, в умовах істотного скорочення виробництва, нестабільної виробничої програми підприємства, непередбачуваної зміни сортаменту продукції та паливно-енергетичних ресурсів, що задіяні в процесах, стає необхідним індивідуальний підхід щодо налаштування режимів роботи конкретного агрегату.

В нашому випадку основним видом сировини на підприємстві є заготовки від сторонніх постачальників, тому нагрівальні колодязі працюють в нехарактерному для них режимі. Замість «гарячих» зливків з конвертерного цеху вимушено використовують «холодні» заготовки. Крім того, у зв'язку з повною відсутністю доменного газу на підприємстві, в якості палива використовується виключно «чистий» природний газ. Таким чином, нагрівальні колодязі працюють в умовах, що значно відрізняються від проектних.

Задачею даного дослідження є визначення раціонального режиму роботи колодязів при епізодичному виконанні замовлень на прокатну продукцію від споживачів.

Методи дослідження. За допомогою математичного моделювання, можна досліджувати практично будь-які процеси, але точність одержуваних результатів залежить, як правило, від "якості" використовуваних фізичних теорій та достовірності вихідних даних та іншого числового матеріалу.

У разі, коли завданням дослідження є пошук укрупнених показників теплової роботи нагрівального колодязя можна обмежитися досить простою інженерною моделлю. В основі цієї моделі інженерна методика розрахунку горіння палива, параметрів теплообміну випромінюванням, нагрівання заготовок, втрат теплоти з робочого простору тощо [1].

Всі розрахунки виконували для умов нагрівальних колодязів з опаленням з центра подини, що розташовані в прокатному цеху №1 металургійного підприємства ПрАТ «ДМЗ».

Вихідні данні:

- паливо - природний газ з $Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 35,627 \text{ МДж/м}^3$.
- розміри робочої камери колодязя $4300 \text{ мм} \times 4300 \text{ мм}$, глибина - 3300 мм .
- кількість заготовок - 13 шт.
- розмір заготовок $450 \text{ мм} \times 250 \text{ мм} \times 2550 \text{ мм}$.

Розрахунок комбінованого режиму нагрівання (I період нагрівання при постійній тепловій потужності $M_0 = \text{const}$, II період при постійній температурі печі $t_{\text{печ}} = \text{const}$) виконується з використанням інженерної методики розрахунку нагрівання циліндру [1].

Основні показники теплової роботи колодязя – продуктивність, питома витрата палива на нагрівання металу, коефіцієнт використання теплоти палива та коефіцієнт корисної дії печі визначаються з використанням залежностей, отриманих проф. І. Д. Семікіним [2].

Результати дослідження. Спочатку виконано розрахунки комбінованого режиму нагрівання заготовок в діапазоні можливих початкових питомих теплових потоків на метал. Реальні заготовки замінили еквівалентними циліндрами однакової маси. Необхідні для подальшого аналізу результати розрахунків наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку нагріву заготовок

Початковий питомий тепловий потік на метал $q_{\text{поч}}$, кВт/м ²	Температура газів на початку нагріву, °С	Тривалість нагріву, год		КВП	
		τ_1	$\tau_{\text{заг}}$	$\eta_{\text{поч}}$	$\eta_{\text{кін}}$
126,229	1229	0,707	2,029	0,649	0,613
108,196	1161	0,933	2,165	0,638	0,637
90,163	1087	1,331	2,382	0,728	0,669
72,131	1004	1,802	2,739	0,775	0,705
54,098	906	2,562	3,350	0,829	0,754
36,065	784	4,022	4,623	0,899	0,833
21,639	650	6,794	7,186	0,975	0,951

Примітка: τ_1 – тривалість першого періоду нагрівання; $\tau_{\text{заг}}$ – загальна тривалість нагрівання металу; КВП – коефіцієнт використання теплоти палива.

Як видно з даних таблиці 1, величина початкового питомого теплового потоку на поверхню заготовок очікувано суттєво впливає на тривалість нагріву як в першому періоді, так і на загальну тривалість процесу.

Для подальшого розрахунку показників теплової роботи колодязя визначили втрати теплоти його робочим простором при різних температурах печі.

Були враховані два види втрат теплоти:

- теплопровідністю через кладку робочої камери;
- випромінюванням в надрекуператорний простір через димовідвідні вікна.

Результати розрахунку представлено на рисунку 1 та у таблиці 2.

Таблиця 2 – Теплові втрати робочого простору колодязя

Температура газів, °С	Теплові втрати, кВт		
	теплопровідністю, $Q_{\text{тепл}}$	випромінюванням, $Q_{\text{вип}}$	загальні, $Q_{\text{впр}}$
600	67,839	40,223	108,062
700	76,854	57,213	134,067
800	82,303	78,431	160,734
900	106,410	101,606	208,016
1000	125,658	135,400	261,058
1100	142,859	172,200	315,059
1200	160,743	215,000	375,743
1300	179,285	264,400	443,685
1400	201,567	320,875	522,442

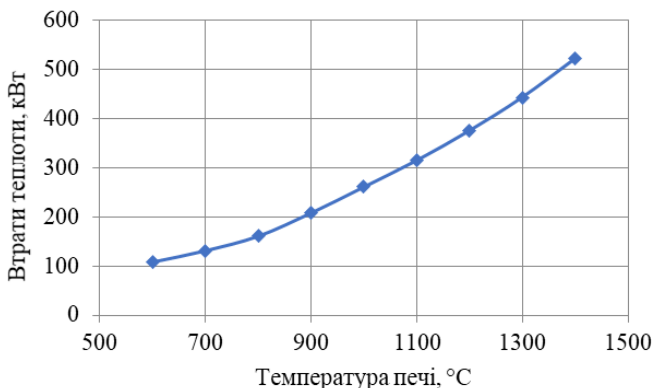


Рисунок 1 – Залежність теплових втрат робочого простору від температури печі

Для розрахунку значення теплової потужності, що забезпечує задану щільність теплового потоку на заготовки на початку нагріву, використовували формулу:

$$M_o^{\max} = M_{\text{роб}} + M_{\text{хх}} = \frac{q_{\text{поч}} \cdot F_{\text{ме}} + Q_{\text{врт}}}{\eta_{\text{поч}}} \quad (1)$$

де $M_{\text{роб}}$ – робоча теплова потужність, Вт; $M_{\text{хх}}$ – потужність холостого ходу, Вт; $q_{\text{поч}}$ – питомий тепловий потік на поверхню заготовок на початку нагрівання, Вт/м²; $F_{\text{ме}}$ – загальна площа поверхні нагріву заготовок, м²; $Q_{\text{врт}}$ – теплові втрати робочого простору колодязя при температурі диму на початку першого періоду нагрівання, Вт; $\eta_{\text{поч}}$ – коефіцієнт використання теплоти палива (КВП) на початку нагрівання.

Відповідно, початкова (максимальна) витрата палива, що забезпечує таку теплову потужність, складає:

$$V_{\Gamma} = \frac{M_o^{\max}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}} \quad (2)$$

де $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – нижча теплота згоряння палива, Дж/м³.

Значення V_{Γ} , визначені для всього можливого діапазону роботи колодязя, наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Характеристики колодязя під час роботи з різною початковою тепловою потужністю

Початковий питомий тепловий потік на метал, кВт/м ²	Початкова теплова потужність, МВт	Витрата палива (максимальна), м ³ /год	Продуктивність, т/год
$q_{\text{поч}}$	Q_o^{\max}	V_{Γ}	P
126,229	37,074	1040,627	14,340
108,196	30,602	858,955	13,436
90,163	24,661	692,194	12,210
72,131	19,188	538,573	10,619
54,098	14,198	398,523	8,683
36,065	9,606	269,627	6,292
21,639	6,189	173,714	4,048

Продуктивність колодязя визначається як:

$$P = \frac{E_{\text{кол}}}{\tau_{\text{заг}}}, \text{ кг/год} \quad (3)$$

де $E_{\text{кол}}$ – ємкість нагрівального колодязя (маса заготовок), кг; $\tau_{\text{заг}}$ – загальна тривалість процесу нагріву, год.

Результати розрахунку наведено в таблиці 3 і на рисунку 2.

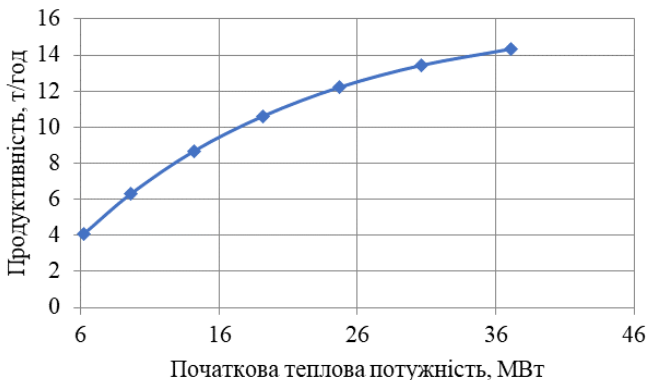


Рисунок 2 – Залежність продуктивності колодязя від початкової теплової потужності

Показники теплової роботи колодязя з різною початковою загальною тепловою потужністю і питомою витратою теплоти на нагрівання зливків розраховували з наступних міркувань.

Очевидно, що у всіх випадках садка металу протягом нагрівання повинна отримувати однакову кількість теплоти:

$$Q_m = E_{\text{кол}} \cdot (i_{\text{кін}} - i_{\text{поч}}), \quad (4)$$

де $i_{\text{кін}}$, $i_{\text{поч}}$ – питома ентальпія металу в кінці та на початку нагріву, відповідно, Дж/кг.

Тому засвоєна теплова потужність визначається тільки загальною тривалістю процесу нагрівання:

$$M_{\text{зас}} = \frac{E_{\text{кол}} \cdot (i_{\text{кін}} - i_{\text{поч}})}{\tau_{\text{заг}}} = \frac{Q_m}{\tau_{\text{заг}}}. \quad (5)$$

Миттєва робоча теплова потужність колодязя змінюється на протязі циклу нагрівання у зв'язку з тим, що залежить від КВП:

$$M_{\text{раб}} = \frac{M_{\text{зас}}}{\eta}. \quad (6)$$

В такому разі, формулу для визначення середньої робочої теплової потужності, що необхідна для розрахунків, можна записати наступним чином:

$$\bar{M}_{\text{роб}} = \frac{M_{\text{зас}} \cdot \tau_{\text{заг}}}{\bar{\eta}_1 \cdot \tau_1 + \eta_k \cdot (\tau_{\text{заг}} - \tau_1)} = \frac{Q_M}{\bar{\eta}_1 \cdot \tau_1 + \eta_k \cdot (\tau_{\text{заг}} - \tau_1)}, \quad (7)$$

де τ_1 – тривалість 1-го періоду, год; $\bar{\eta}_1$ – середній КВП у першому періоді; η_k – значення КВП у другому періоді; $\tau_{\text{заг}}$ – загальний час нагрівання зливоків, год.

Середня потужність холостого ходу визначається величиною теплових втрат (теплові втрати зростають від мінімального значення на початку 1-го періоду нагрівання, до максимального на початку та протягом усього 2-го періоду нагрівання при $t_{\text{пнч}} = \text{const}$) та величиною КВП, тому її можна визначити за виразом:

$$\bar{M}_{\text{хх}} = \frac{\bar{Q}_{\text{впрп},1} \cdot \tau_1}{\bar{\eta}_1 \cdot \tau_{\text{заг}}} + \frac{\bar{Q}_{\text{впрп},2} \cdot (\tau_{\text{заг}} - \tau_1)}{\eta_k \cdot \tau_{\text{заг}}}. \quad (8)$$

де $\bar{Q}_{\text{впрп},1}$ – середні теплові втрати в першому періоді нагрівання при $M_0 = \text{const}$, Вт; $\bar{Q}_{\text{впрп},2}$ – теплові втрати у 2-му періоді нагрівання.

Остаточна загальна середня теплова потужність колодязя:

$$\bar{M}_o = \bar{M}_{\text{роб}} + \bar{M}_{\text{хх}}. \quad (9)$$

Витрату теплоти на 1 кг зливоків можна розрахувати по формулі:

$$k = \frac{\bar{M}_o}{P}, \text{ Дж/кг}. \quad (10)$$

Питомі витрати природного газу та умовного палива на нагрівання 1 кг металу визначаються як:

$$b_{\Gamma} = \frac{k}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad b_{\text{усл}} = \frac{k}{Q_{\text{усл}}}, \text{ кг у.п./кг}, \quad (11)$$

де $Q_{\text{усл}} = 29,3 \cdot 10^6$ Дж/кг у.п. – теплота згоряння умовного палива.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) нагрівального колодязя розраховується як відношення засвоєної металом теплоти до теплоти, витраченої на процес нагрівання, тобто:

$$\text{ККД} = \frac{Q_M}{\tau_{\text{заг}} \cdot \bar{M}_o} \cdot 100 \% . \quad (12)$$

Результати виконаних розрахунків представлені в таблиці 4 та на рис. 3.

Таблиця 4 – Показники теплової роботи нагрівального колодязя

Початкова теплова потужність, кВт	Продуктивність, т/год	Питома витрата умовного палива, кг/т	Питома витрата природного газу, м ³ /т	ККД колодязя, %
37074,644	14,340	53,998	44,409	54,614
30602,183	13,436	52,187	42,919	56,509
24660,945	12,210	50,573	41,592	58,312
19187,866	10,619	49,177	40,444	59,968
14198,285	8,683	48,258	39,688	61,11
9606,062	6,292	48,290	39,714	61,069
6188,947	4,048	50,469	41,506	58,432

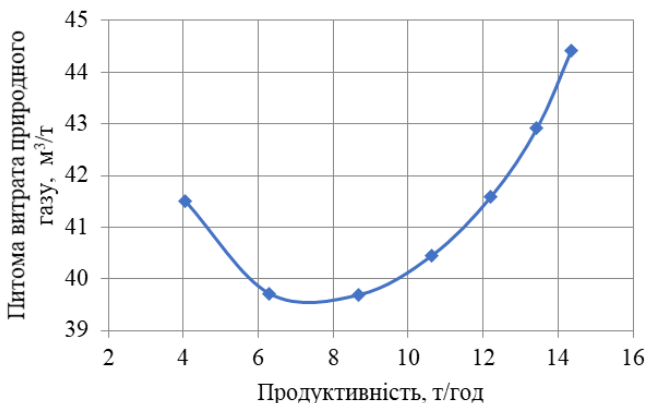


Рисунок 3 – Залежність питомої витрати природного газу від продуктивності печі

Висновки

В умовах нестабільної роботи підприємства, коли виробнича програма визначається наявністю замовлень, робота печей повинна підпорядковуватись, головним чином, забезпеченню прийнятних показників енергоефективності – мінімально можливій питомій витраті палива та максимальному ККД печі.

Виконані дослідження показали, що залежність питомої витрати палива від продуктивності нагрівального колодязя носить екстремальний характер. З графіка на рис. 3 випливає, що при продуктивності колодязя 7,0–7,5 т/год, спостерігається мінімальна питома витрата палива (природного газу) на рівні 39,68–39,71 м³/т.

Цей інтервал продуктивностей відповідає початковій загальній тепловій потужності колодязя 9,6– 14,2 МВт і максимальній витраті палива на початку нагріву 270–400 м³/год. Загальна тривалість циклу нагрівання садки металу «холодного» посаду складає 3,4– 4,6 годин. Температура димових газів, що залишають піч, є низькою. На початку циклу нагрівання вона складає 784 °С, а у кінці першого періоду – 1291 °С, що забезпечує досить високий ККД 61,10%.

Таким чином для умов роботи рекуперативних нагрівальних колодязів прокатного цеху №1 ПрАТ «ДМЗ» визначено діапазон оптимальної продуктивності, в якому досягаються мінімальні питомі витрати палива на нагрівання металу і максимальний ККД печей. Робота колодязів по такому режиму високі дозволить підвищити показники енергоефективності виробництва в прокатному цеху, а саме – мінімізувати витрати палива на нагрівання металу перед подальшою обробкою тиском.

Перелік посилань

1. *Металлургические печи*: Теория и расчеты / Губинский В. И., Тимошпольский В. И., Ольшанский В. М. и др. Минск : Белорусская наука. В 2-х т. Т. 2. 2007. 832 с.
2. Губинский В. И. *Металургийні печі*. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2006. 85 с.

References

1. Gubinskii, V. I., Timoshpolskii, V. I., Olshanskii, V. M. et al (2007). *Metallurgicheskie pechi: Teoriia i raschety* (Vol. 1). Belorusskaia nauka
2. Hubynskiy, V. Y. (2006). *Metalurhiini pechi*. NMetAU

Yu. M. Radchenko¹, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0002-5055-6707

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

O. A. Rebrykov², Foreman of soaking pits

M. O. Shtatskyi¹, Student

¹ *Ukrainian State University of Science and Technologies*

² *Private Joint Stock Company "DMZ"*

DETERMINATION OF THE INITIAL HEAT OUTPUT OF THE SOAKING PIT UNDER CONDITIONS OF UNSTABLE OPERATION OF THE METALLURGICAL PLANT

Abstract. The study is devoted to finding ways to improve the thermal performance of recuperative soaking pit when operating in modern conditions, which are characterized by unpredictability in the supply of fuel and energy resources to a metallurgical plant, the lack of a sustainable production program, the variety of

ingots (billets), etc. The study aims to determine the rational operation mode for heating ingots (billets), which will ensure a minimum specific fuel consumption when fulfilling a production order. As a research method, the authors used methods for calculating metal heating and indicators of thermal performance based on the engineering theory of heating. The engineering model of heat transfer made it possible to obtain data on the temperature distribution across the ingot cross-section during heating without solving the differential heat conduction equation, as well as to calculate the duration of heating periods and heat losses of the working chamber of the well to the environment. Using the concept of thermal power made it possible to determine the main indicators of the thermal operation of the soaking pit: productivity, specific fuel consumption for heating the metal, and the efficiency of the soaking pit. The paper investigates the thermal performance of a recuperative soaking pit according to a typical operation mode of heating ingots (billets): the first period is heating with constant thermal power, the second is holding ingots (billets) at a constant temperature of the furnace chamber. It has been determined that when rectangular steel billets are heated, the minimum specific fuel consumption is ensured by operating a soaking pit with an initial natural gas consumption of 269-398 m³/hour. This heat rating of the soaking pit ensures an acceptable heating time for a metal mass of 29- 32 tons at the level of 3.4- 4.6 hours.

Key words: soaking pit, productivity, heat output, specific fuel consumption.

For citation: Radchenko, Yu. M., Gupalo, O. V., Rebrykov, O. A., & Shtatskyi, M. O. (2024). Determination of the initial heat output of the soaking pit under conditions of unstable operation of the metallurgical plant. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 731-740. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-731-740>

Стаття надійшла до редакції збірника 25.09.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)