

УДК 662.614.2:661.975:669.18

ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМІВ РОЗІГРІВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ АГРЕГАТІВ**Петрик О.А.¹**, канд. техн. наук., **Назаренко І.А.²**, канд. техн. наук¹Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, 69063, Україна, доцент, iternell17@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-5824-6287>²Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, 69063, Україна, доцент, irinan842@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4200-4424><https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.7>

В статті наведено результати досліджень факторів, що впливають на стійкість склепіння високотемпературних агрегатів. Розраховано тепловий баланс, на основі якого розроблено новий раціональний режим розігрівання, що дозволить забезпечити рівномірний температурний градієнт по всій поверхні склепіння, а також простору печі. Оцінено зниження палива на процес розігрівання.

The article presents the results of studies of factors affecting the stability of the vault of high-temperature aggregates. The thermal balance was calculated, on the basis of which a new rational heating mode was developed, which will ensure a uniform temperature gradient over the entire surface of the vault, as well as the space of the furnace. Estimated reduction of fuel for the heating process.

Бібл. 8, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: тепловий режим, нагрівання, тепловий баланс, прихід теплоти, паливо, теплота.

ΔН - надлишок теплоти;

М_{прих} - кількість теплоти, що приходить;М_{витр} - кількість теплоти, що витрачається;

ГДж – одиниці виміру кількості теплоти.

Вступ

Однією з головних проблем сучасного світу є пошук економії енергоресурсів, а саме палива. Високотемпературні печі є одними з найбільших споживачів палива. Теплотехнологічна установка (під-агрегат), являє собою сукупність робочого простору, у межах якого здійснюється високотемпературний процес, і устаткування, що забезпечує його реалізацію.

Верхня частина огороження реактора (робочого простору) називається склепінням. Склепіння – це елемент, що визначає стійкість агрегату загалом і впливає на техніко-економічні показники виробництва.

На печах з інтенсивним продуванням ванни киснем стійкість склепіння становить близько 300 плавов. У процесі технологічного процесу на склепіння печі впливають такі фактори:

- нерівномірність нагрівання внутрішньої поверхні склепіння по довжині та ширині внаслідок нерівномірності температурного поля факела при розігріванні агрегату;
- коливання температури ходу залежно від технологічних періодів;
- зміна хімічного та фазового складів вогнетривкого матеріалу склепіння в результаті впливу бризок шлаку та металу, плавильного пилу та газової атмосфери робочого простору печі.

Інтенсифікація теплового та технологічного режимів сприяє посиленню та прискоренню дії вищевказаних процесів. Тому питанню якісного розігрівання склепіння агрегату треба приділяти особливу увагу [1].

Методика проведення дослідження

Розглянемо схему потоків теплоти у високотемпературному агрегаті [2] при його розігріванні (Рис.1).

Тепловий баланс буде мати вигляд:

$$M_{\text{прих}} = M_{\text{витрат}} \quad (1)$$

Прихід теплоти розраховується по наступній формулі:

$$M_{\text{прих}} = M_{\text{Хім.т}} + M_{\text{Фіз.т}} + M_{\text{Фіз.пов}}, \quad (2)$$

де М_{Хім.т} - хімічна теплота палива, ГДж;

М_{Фіз.т} - фізична теплота палива, ГДж;

М_{Фіз.пов} - фізична теплота повітря, яке надійшло на горіння, ГДж.

Витрати теплоти розраховуються по наступній формулі:

$$M_{\text{витрат}} = M_{\text{нагрів}} + M_{\text{відх}} + M_{\text{охол.к}} + M_{\text{охолш}} + M_{\text{ок}} + M_{\text{винром}} + M_{\text{винб.г}} + M_{\text{підсм}}, \quad (3)$$

де М_{нагрів} - витрати теплоти на нагрів склепіння, ГДж;

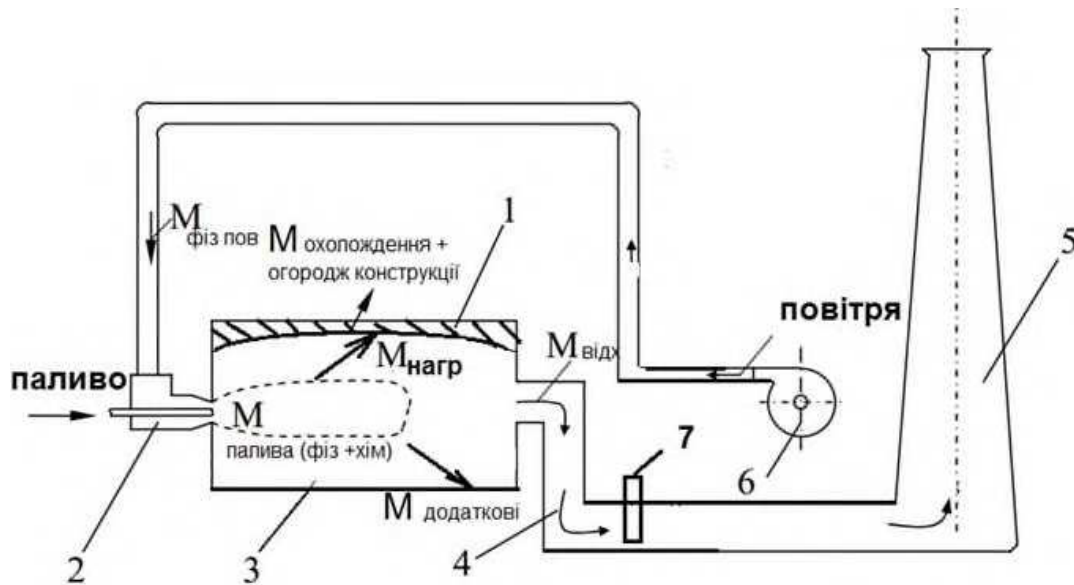


Рис. 1. Потоки теплоти у високотемпературному агрегаті при розігріві:
 1 – робочий простір печі; 2 – пальник; 3 – склепіння; 4 – димовий канал; 5 – димова труба;
 6 – вентилятор; 7 – димовий шибер

$M_{\text{відх}}$ – витрати теплоти з димовими газами, що відходять з печі, ГДж;

$M_{\text{охол.к}}$ – витрати теплоти на охолодження кришок завальочних вікон, ГДж;

$M_{\text{охол.ш}}$ – витрати теплоти на охолодження шиберів, ГДж;

$M_{\text{ок}}$ – витрати теплоти через огорожувальні конструкції, ГДж;

$M_{\text{випром}}$ – витрати теплоти випромінюванням через відчинені вікна й гляділки, ГДж;

$M_{\text{виб.г}}$ – витрати теплоти з газами, що вибиваються, ГДж;

$M_{\text{підсм}}$ – витрати теплоти від холодного повітря, що підсмоктується в піч, ГДж.

Оцінка надлишку теплоти проводиться по наступній формулі:

$$\Delta H = M_{\text{витр}} - (M_{\text{витр}} - M_{\text{прих}}) * 100\% / M_{\text{прих}} \quad (4)$$

Варто відзначити, що при $\Delta H > 0$ – є присутній надлишок прибуткової частини теплоти, тобто в агрегат вноситься більше теплоти, ніж споживається, що у свою чергу йде на збільшення втрат; при $\Delta H < 0$ – в агрегат вноситься менше теплоти, ніж необхідно для забезпечення нормальної теплової роботи агрегату (агрегат працює з недоліком теплоти), що у свою чергу призводить до неякісного прогрівання склепіння. Найбільш раціонально вести тепловий баланс плавки з надлишком теплоти в діапазоні до 2,5 % [3].

Результати досліджень

Розрахувавши тепловий баланс (таблиця 1) нагріву склепіння відповідно до класичного графіку розігрівання [3] і методики [2] відзначимо присутність профіциту теплоти. На підставі отриманих результатів і наявності надлишку теплоти в прибутковій частині розрахунковим шляхом виконаємо підбір тривалості й витрат палива для нового графіку (нового теплового режиму). Результати розрахунків зведено в таблицю 1.

Слід зазначити, що у пічній системі, витрати теплоти з димовими газами, що відходять з печі, складаються з фізичної теплоти гарячих газів, що відходять, та їх об'єму [2]. При цьому на них має істотний вплив швидкість газів, що відходять.

Щоб мати змогу знизити витрати палива при розігріванні високотемпературного агрегату, треба знизити втрати теплоти з димовими газами, що відходять. Одним із шляхів є зменшення швидкості продуктів згоряння шляхом зменшення розрідження (на 20-25%) в димовому тракті (газів, що йдуть на димову трубу), за допомогою керування системою димових шиберів.

Виконаний порівняльний аналіз розігрівання дослідного та базового варіантів режимів розігрівання. З аналізу встановлене наступне:

- тривалість розігрівання знижено на 4 години або на 12,5 % (з 32 до 28 години);
- витрата палива знижена на 234,9 ГДж або 10,7 % (з 2014,9 до 1780,0 ГДж);

• витрата теплоти з газами, що відходять, знижено на 212,7 ГДж або 19,7 % (з 1079,0 до 866,0 ГДж).

При цьому нев'язку по балансу знижено на 5,59 % (з 5,59 до 0 %).

Дані Таблиці 1 свідчать про істотне поліпшення показників нагрівання агрегату, корисно використовувати тепло агрегату зростає, а витрати палива знижуються.

Отримані результати дозволяють впритул підійти до питання побудови нового раціонального графіка розігрівання склепіння високотемпературного агрегату.

Табл. 1. Тепловий баланс агрегату при розігріванні

№ п/п	Прихід теплоти	Класичний графік нагрівання 32 год		Запропонований графік нагрівання 28 год		№ п/п	Витрата тепла	Класичний графік нагрівання 32 год		Запропонований графік нагрівання 28 год	
		ГДж	%	ГДж	%			ГДж	%	ГДж	%
1	Хімічна теплота палива	2014,9	93,7	1780	93,8	1	На нагрів склепіння	559,3	27,56	559,3	29,4
2	Фізична теплота палива	2,0	0,1	2,0	0,1	2	З газами, що відходять	1079	53,15	866,0	45,6
3	Фізична теплота повітря, що надійшло на горіння	132,7	6,2	116	6,1	3	На охолодження кришок завалочних вікон	67,0	3,30	58,7	3,09
						4	На охолодження шиберів	24,1	1,19	21,1	1,11
						5	Через огорожувальні конструкції	211,3	10,41	189,4	9,98
						6	Випромінюванням через відкриті вікна та гляділки	7,1	0,35	6,9	0,36
						7	З газами, що вибиваються	60,4	2,98	178,0	9,38
						8	від холодного повітря, що підсмоктується в піч	21,3	1,05	18,6	0,98
	Загальний прихід теплоти	2149,5	100	1898	100		Сумарні теплові витрати	2029,4	100	1898,0	100
нев'язка балансу класичний графік							5,59%				
нев'язка балансу запропонований графік							0,0%				

Що дозволить знизити витрати палива на нагрівання, а також підвищити продуктивність агрегату за рахунок скорішого виходу на робочий режим.

Згідно [3, 7] розігрівання сталеплавильних печей після повної заміни склепіння здійснюється за 32 годинними графіками. Швидкість розігрівання при постійній подачі палива складає 55-75 °С/год. Підймання температури склепіння здійснюється безперервно та без температурних витримок, що не враховує виникаючі в процесі розігрівання внутрішні механічні напруження вогнетривких матеріалів, що виникають внаслідок

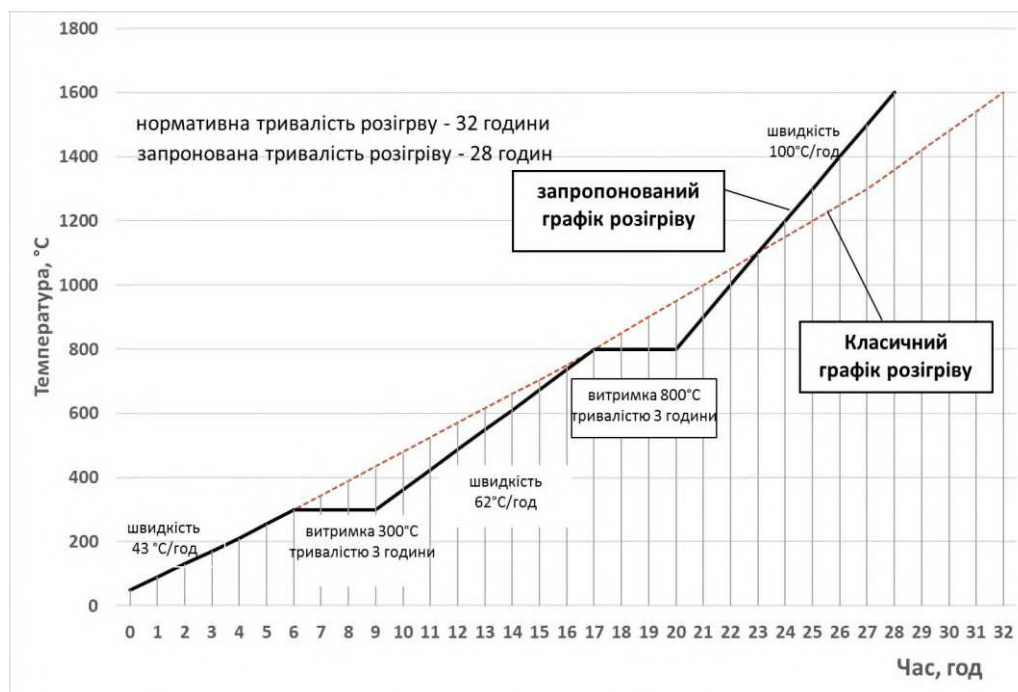


Рис. 2. Графік розігрівання склепіння високотемпературного агрегату за класичною технологією (1) та запропонований (2)

підвищеного лінійного розширення прямов'язаних периклазохромітових вогнетривких виробів, пов'язаних з їх перекристалізацією в інтервалах 300-350 °C і 800-850 °C, що може призвести до утворення тріщин і, як наслідок, сколювання склепін в процесі подальшої експлуатації, зниження стійкості головного склепіння.

На основі розрахунків, в основі яких лежать рівняння теплового балансу високотемпературного агрегату [2,6], а також рекомендації [3,4,8] щодо розігріву вогнетривких виробів, розроблено новий раціональний режим розігрівання. Графіки розігрівання склепіння високотемпературного агрегату за класичною технологією [3, 7] та запропонований приведено на рис. 1.

Висновки та перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі

На основі досліджень, в основі яких лежать рівняння теплового балансу високотемпературного агрегату, розроблено новий раціональний режим розігрівання.

Згідно запропонованого температурного режиму швидкість розігрівання при диференціальній подачі палива складає: з 1 по 6 годину - 43 °C/год, витримка при температурі 300°C (тривалістю 3 години), з 9 по 17 годину - 62 °C/год, витримка при температурі 800°C (тривалістю 3 години), з 20 до 28 години - 100 °C/год.

За розрахунками, кількість теплоти, що необхідно підвести до склепіння, щоб його нагріти складає:

- за класичною технологією - 13 ГДж/м²,
- за новою технологією – 11,6 ГДж/м² (зниження на 1,4 ГДж/м² або 10,7%).

Новий тепловий режим розігріву склепіння печі дозволить забезпечити рівномірний температурний градієнт по всій поверхні склепіння, а також простору печі: з витримкою на 300°C і 800°C в зонах підвищеного лінійного розширення прямов'язаних периклазохромітових виробів. При цьому зниження палива складає 10,7%.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ревун М.П., Чепрасов О.І. Математичне моделювання нагріву металу в печі (повідомлення 2) // *Металургія: наукові праці ЗДІА.- Запоріжжя: ЗДІА, - 2011. – № 23. - С. 163-171.*
2. Губинський В.Й. *Металургійні печі: Навч. посібник.* - Дніпро: НМетАУ, 2006. - 85 с.
3. *Сушіння та розігрів печей* [Електронний ресурс]; Україна, 2016. - Режим доступу: <https://studfile.net/preview/9329465/page:3>
4. Сущенко А.В. Порівняльний аналіз методик розрахунку матеріального та теплового балансів киснево-конвертерної плавки // *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наукових праць / ПДТУ.- Маріуполь, 2013. - Вип. 27. - С. 17-29.*

5. Тымчак В.М., Гусовский В.Л. Расчеты нагревательных и термических печей: справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 481 с.

6. Губинський В.Й. Нагрівальні печі металургії – сьогодні та завтра // Теорія і практика металургії, - 2004. – № 6. - С. 56-60.

7. Рыженков А.Н., Крикунов Б.П., Петров Ю.В. Патент Украины, № 20930. Способ управления тепловым режимом сталеплавильной печи. – Оpubл. 15.02.2007. Бюл. № 2.

8. Терещенко М.О., Горський А.М. Вогнетривких матеріалів промисловість // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс]; НАН України, НТШ.– К.: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2005. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-35277>

IMPROVEMENT OF THERMAL MODES OF WARMING UP HIGH-TEMPERATURE UNITS

Petryk O.A.¹, Nazarenko I.A.²

¹PhD (Engin.), National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 64, Zhukovsky str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, orcid.org/0000-0002-5824-6287, e-mail: iternell17@ukr.net

²PhD (Engin.), Associate Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 64, Zhukovsky str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, orcid.org/0000-0003-4200-4424, e-mail: irinan842@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.7>

One of the main problems of the modern world is the search for economy of energy resources that could compete with natural gas. High-temperature furnaces are one of the biggest consumers of fuel. The heat-technology installation (furnace unit) is a set of working space within which a high-temperature process is carried out, and the equipment that ensures its implementation.

The upper part of the reactor enclosure (working space) is called the vault. The vault is an element that determines the stability of the unit in general and affects the technical and economic indicators of production.

On furnaces with intensive blowing of the bath with oxygen, the stability of the vault is about 300 melts. In the course of the technological process, the furnace vault is affected by the following factors:

- uneven heating of the inner surface of the vault along the length and width due to the uneven temperature field of the torch when heating the unit;
- temperature fluctuations depending on technological periods;
- a change in the chemical and phase composition of the refractory vault material as a result of the influence of slag and metal splashes, smelting dust and the gas atmosphere of the working space of the furnace. The intensification of thermal and technological regimes contributes to strengthening and accelerating the action of the above-mentioned processes. Therefore, special attention should be paid to the issue of high-quality heating of the vault of the unit.

The article presents the results of studies of factors affecting the stability of the vault of high-temperature aggregates.

On the basis of calculations based on the heat balance equations of the high-temperature unit, as well as

recommendations for heating refractory products. In this article has been developed a new rational heating mode.

The new thermal mode of heating the vault of the furnace will ensure a uniform temperature gradient over the entire surface of the vault, as well as the space of the furnace: with exposure to 300°C and 800°C in the zones of increased linear expansion of directly bonded high-temperature products. And also increase the productivity of the unit due to faster entry into the working mode. The fuel reduction for the heating process is estimated about 10.7%.

References 8, tables 1, figures 2.

Keywords: thermal regime, heating, thermal balance, heat arrival, fuel.

1. Revun M.P., Cheprasov A.I. Matematychnye modelyuvannya nahrivu metalu v pechi [Mathematical modeling of metal heating in a furnace (message 2)] // Metalurhiya: naukovy pratsi ZDIA. - Zaporizhzhia: ZDIA, - 2011. - No. 23. - P. 163-171. (in Ukr.)

2. Gubinsky V.I. Metalurhiyni pechi [Metallurgical furnaces]: Navch. posibnyk. - Dnipro: NMetAU, 2006. - 85 p. (in Ukr.)

3. Sushinnya ta rozihriv pechey [Drying and heating of furnaces] [Electronic resource]; Ukraine, 2016. - Access mode: <https://studfile.net/preview/9329465/page:3> (in Rus.)

4. Sushchenko A.V. Porivnyal'nyy analiz metodyk rozrakhunku material'noho ta teplovoho balansiv kysnevo-konverternoyi plavky [Comparative analysis of methods for calculating material and heat balances of oxygen-converter smelting] // Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu: zb. naukovykh prats' / PDTU.- Mariupol, 2013. - Issue 27. - P. 17-29. (in Ukr.)

5. Tymchak V.M., Gusovsky V.L. Raschety nagrevatel'nykh i termicheskikh pechey: spravochnik [Calculations of heating and thermal furnaces: reference book]. - M.: Metallurgy, 1983. - 481 p. (in Rus.)

6. Gubinsky V.I. Nahrival'ni pechi metalurhiyi – s'ohodni ta zavtra [Heating furnaces of metallurgy – today and tomorrow] // Teoriya i praktika metallurgii, - 2004. - No. 6. - P. 56-60. (in Ukr.)

7. Ryzhenkov A.N., Krykunov B.P., Petrov Yu.V. Patent of Ukraine, No. 20930. Sposob upravleniya teplovym rezhimom staleplavil'noy pechi [Method of controlling the thermal regime of a steel-melting furnace]. - Publ. 15.02.2007. Bul. No. 2. (in Rus.)

8. Tereshchenko M.O., Gorskyi A.M. Vohnetryvkykh materialiv promyslovist' [Refractory materials industry] // Encyclopedia of Modern Ukraine [Electronic resource]; Entsyklopediya Suchasnoyi Ukrayiny, National Academy of Sciences. - K.: Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2005. - Access mode: <https://esu.com.ua/article-35277> (in Ukr.)

Отримано 07.03.2023

Received 07.03.2023