

УДК 666.76.041:519.28

**В.І. ІВАНОВ**, старший науковий співробітник  
**Т.М. НЕСТЕРЕНКО**, доцент, кандидат технічних наук  
**В.Ю. ЗІНЧЕНКО**, доцент, кандидат технічних наук  
**О.І. ЧЕПРАСОВ**, професор, кандидат технічних наук

## МЕТОД ІНЖЕНЕРНОГО РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ ВИПАЛЮВАННЯ НАПІВФАБРИКАТУ ВОГНЕТРИВІВ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТУНЕЛЬНИХ ПЕЧАХ

(Повідомлення 1)

*Запорізька державна інженерна академія*

На основі вирішення диференціального балансового рівняння теплообміну пластини у протитечії запропоновано метод інженерного розрахунку для коригування температурного режиму випалювання напівфабрикату вогнетривів, завантаженого у садки на пічні вагонетки. Детально викладено методики обчислення коефіцієнтів передавання теплоти у діючих високотемпературних тунельних печах. Розрахунки з коригування температурних режимів випалювання дозволяють забезпечити стабілізацію якісних показників готової продукції.

Ключові слова: високотемпературна тунельна піч, напівфабрикат вогнетривів, температурний режим випалювання, рівняння теплообміну пластини у протитечії, коригування витрати теплоносія

*Вступ.* Під час продукування вогнетривів найважливішою операцією є процес випалення напівфабрикатів у робочому об'ємі тунельних печах, які опалюють природним газом. Напівфабрикат завантажують на футерований під пічних вагонеток у садки, які складаються із стовпців з зазорами (або без них); вагонетки періодично проштовхують пічним каналом за автоматичним режимом. Створення у зоні випалення печі ділянки високої температури досягають розміщенням у її бічних стінах низки інжекційних пальників, спрямованих один назустріч одному. Для спалювання палива використовують гаряче повітря, що відбирають у зоні охолодження печі за допомогою інжекційних пристроїв і підводять до пальників індивідуальними каналами, виконаними у бічних стінах. Окрім того, здійснюють подавання повітря безпосередньо пічним каналом до зони випалення із зони охолодження за допомогою спеціально встановлених циркуляційних вентиляторів.

Як свідчить практика теплової роботи печей даного типу, нерідко виникає необхідність змінювання продуктивності зазначених агрегатів за існуючої схеми завантаження напівфабрикату вогнетривів на пічні вагонетки. У цьому разі слід виконувати коригування температурного режиму роботи печі для забезпечення стабільної якості готової продукції.

*Постановка завдання.* У зв'язку з вищевикладеним слід забезпечувати стабільність середньої температури напівфабрикату на позиціях зони випалення, що дозволить до мінімуму понизити коливання якісних показників готової

продукції. Тоді завдання можна сформулювати таким чином: визначити необхідні значення температури теплоносія ( $T_T$ ), для досягнення інваріантності (*idem*) середньої температури напівфабрикату вогнетривів на позиціях зони випалення печі під час змінювання тривалості його нагрівання ( $\tau$ ) в протитечії.

*Головна частина досліджень.* Процес нагрівання напівфабрикату вогнетривів у тунельних печах за точним підходом слід розглядати як нагрівання в нерухомому шарі із ступінчастим змінюванням початкових і граничних умов.

Під час розробки інженерної моделі зазначеного процесу приймали додаткові обмеження:

- плавне безперервне переміщення напівфабрикату вогнетривів назустріч теплоносію із середньою швидкістю, що дорівнює  $\omega = \ell_{\text{печ}} / \tau$ , де  $\ell_{\text{печ}}$  – довжина тунельної печі, м;  $\tau$  – тривалість знаходження матеріалу в печі;
- відсутність теплообміну робочого об'єму печі з довкіллям, а також між садкою напівфабрикату вогнетривів і матеріалом футерівки стін печі;
- під пічних вагонеток не охолоджує нижні шари садки напівфабрикату вогнетривів.

Вирішенням балансового диференціального рівняння теплообміну пластини у протитечії є співвідношення [1]:

$$\frac{\bar{T}_m}{T_T} = 1 - \exp \left[ - \frac{\alpha_{\Sigma} \cdot F_n \cdot n}{M_m \cdot c_m} \cdot \left( 1 - \frac{M_m \cdot c_m}{M_T \cdot c_T} \right) \cdot \frac{\tau}{m} \right], \quad (1)$$

де  $\bar{T}_m$  – температура напівфабрикату вогнетривів, що є середньою за перерізом стовпця садки, К, для будь-якого моменту нагрівання, с;  $T_T$  –

температура теплоносія на вході до протитечії, К;  $\alpha_{\Sigma}$  – сумарний коефіцієнт тепловіддавання, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $F_n$  – питома поверхня напівфабрикату, яка сприймає теплоту, в протитечії, та є віднесеною до одиниці його об'єму, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $M_m$ ,  $M_t$  – масова витрата напівфабрикату вогнетривів, кг/с, та об'ємна витрата теплоносія, м<sup>3</sup>/с, відповідно;  $c_m$ ,  $c_t$  – теплоємність напівфабрикату вогнетривів, середня в інтервалі температур 0... $\bar{T}_m$ , кДж/(кг·К), теплоємність теплоносія, середня в інтервалі температур 0... $T_t$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К), відповідно;  $m$  – поправний коефіцієнт, що враховує масивність стовпця садки напівфабрикату вогнетривів,  $m=1+K \cdot Bi$ ;  $Bi$  – критерій масивності Біо;  $K$  – коефіцієнт форми стовпцю напівфабрикату, його форму приймають як необмежену пластину;  $\tau$  – тривалість випалення, с.

Вирішення рівняння (1) відносно параметра  $T_t$  після нескладних перетворень має вигляд:

$$T_t = \frac{\bar{T}_m = edem}{1 - \exp(\eta)}, \quad (2)$$

де

$$\eta = \frac{\alpha_{\Sigma} \cdot F_{\Sigma} \cdot n}{M_t \cdot c_t \cdot (1+m)} \cdot \left( \frac{M_t \cdot c_t}{M_m \cdot c_m} - 1 \right),$$

тут  $n$  – кількість позицій (вагонеток) у зонах підігрівання та випалення печі;  $F_{\Sigma}$  – сумарна поверхня напівфабрикату вогнетривів, що сприймає теплоту на пічній вагонетці, м<sup>2</sup>;  $F_{\Sigma} = F_n \cdot V_m$ ;  $V_m$  – об'ємна витрата напівфабрикату вогнетривів, м<sup>3</sup>/с;  $M_m$  – маса напівфабрикату вогнетривів, що завантажують на пічну вагонетку, кг.

Під час визначення температури теплоносія на  $i$ -ій позиції зони випалення тунельної печі  $T_t$  враховували, що радіаційні пірометри, які контролюють температуру в робочому об'ємі зазначеної зони, фіксують сумарний потік випромінювання первинного випромінювача (теплоносія) та вторинного сірого випромінювача (напівфабрикату), тобто температуру усередненого випромінювача, яку приймають як температуру печі  $T_{печ}$ .

Для інженерних обчислень за формулою (2) вводять припущення, що  $T_t \cong T_{печ}$ , яке вносить певну погрішність до оцінки температури теплоносія, а, отже, і в розрахункові значення температури напівфабрикату  $T_m$ , оскільки  $T_t > T_{печ} > T_m$ . Проте така погрішність є рівноцінною на всіх позиціях зони випалення і тому не повинна вносити суттєву помилку до коригування темпе-

ратури теплоносія  $T_t$  за інваріантності розрахункової температури напівфабрикату  $\bar{T}_m$ .

Тому рівняння (2) можна записати у вигляді

$$T_{печ} = \frac{\bar{T}_m = edem}{1 - \exp(\eta)}. \quad (3)$$

Значення сумарного коефіцієнта тепловіддавання  $\alpha_{\Sigma i}$  для  $i$ -ої позиції зони випалення обчислюють з використанням формули

$$\alpha_{\Sigma i} = \alpha_{пр, i} + \alpha_{кон, i}, \quad (4)$$

де  $\alpha_{луч, i}$  – коефіцієнт тепловіддавання за умови його променистого складової, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $\alpha_{пр, i} = q_{пр, i} / (T_{т, i} - T_{м, i})$ ;  $q_{пр, i}$  – променистий тепловий потік для  $i$ -ої позиції зони випалення, кВт/м<sup>2</sup>;

$$q_{пр, i} = \frac{4,96}{\left\langle (1/\varepsilon_{т, i}) + (1/\varepsilon_{м, i}) - 1 \right\rangle} \cdot \left\langle \left( \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_{т, c}} \right)_i \cdot \left( \frac{T_{т, i}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{м, i}}{100} \right)^4 \right\rangle, \quad (5)$$

де  $T_{т, i}$ ,  $T_{м, i}$  – температура теплоносія та напівфабрикату, К, для  $i$ -ої позиції зони випалення відповідно;  $\varepsilon_{т, i}$ ,  $\varepsilon_{т, c, i}$  – ступінь чорноти теплоносія за  $T_{печ, i}$  та  $T_{м, i}$  відповідно;  $\varepsilon_{м, i}$  – ступінь чорноти напівфабрикату за  $T_{м, i}$ .

Ступінь чорноти теплоносія  $\varepsilon_{т, i}$ ,  $\varepsilon_{т, c, i}$  обчислюють за значенням парціального тиску трьохатомних газів і величиною середнього переміщення променя з використанням графіків випромінювання газів [2].

За умови обтікання потоком теплоносія всі плоскі теплообмінні поверхні садки напівфабрикату вогнетривів у тунельній печі поділяють на такі, що розташовано паралельно руху потоку (подовжні поверхні) та розташовано перпендикулярно напрямку його руху (поперечні поверхні), відносна частка яких залежить від конструкції садки.

У роботі [3] подано залежність, що дозволила узагальнити значний експериментальний матеріал, одержаний різними методами під час дослідження конвективного теплообміну в садках напівфабрикату вогнетривів [4-8]:

$$Nu = 0,08 Re^{0,7}, \quad (6)$$

де  $Nu$  – середній безрозмірний коефіцієнт тепловіддавання (критерій Нуссельта),  $Nu = \alpha \cdot d / \lambda$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддавання, Вт/(м·К);  $d$  – еквівалентний діаметр каналу садки напівфабрикату вогнетривів, м;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності теплоносія, Вт/(м·К);  $Re$  – критерій Рейнольдса,  $Re = \omega \cdot d / \nu$ ,  $\omega$ ,  $\nu$  – швид-

кість, м/с, і кінематична в'язкість теплоносія, м<sup>2</sup>/с, відповідно.

Для суцільних стовпців садки напівфабрикату вогнетривів під час розрахунків середнього для подовжного каналу значення критерію Нуссельта слід використовувати співвідношення [3]:

$$Nu = \eta \cdot \left[ 1 + 45,5 \frac{d}{x} \cdot \frac{(\ell/\delta) \cdot Re^{-0,37}}{(1 + 0,6 \ell/\delta)} \right], \quad (7)$$

де  $\eta = 1,165 Pr^{0,43} \cdot T_{\phi}^{-0,5}$  [9,10];  $Pr$  – критерій Прандтля;  $T_{\phi}$  – температурний фактор;  $\ell/\delta$  – критерій входу теплоносія до садки напівфабрикату;  $\ell$  – величина подовжного проміжку між стовпцями садки, м;  $\delta$  – половина товщини стовпця, м,  $x/d$  – відносна довжина каналу садки,  $x$  – довжина каналу, м.

Для поперечної поверхні садки напівфабрикату вогнетривів значення зазначеного критерію обчислюють за формулою:

$$Nu = \eta \cdot [0,043 Re^{0,7} \cdot (0,5 + 0,1 \delta/r)], \quad (8)$$

де  $r$  – величина проміжку між стовпцями садки, м.

Загальну поверхню садки напівфабрикату вогнетривів  $F_{\Sigma}$  на пічній вагонетці, що сприймає теплоту, визначають як

$$F_{\Sigma} = 2n_{ст} \cdot \ell_{ст} \cdot h_{ст}, \quad (9)$$

де  $n_{ст}$  – кількість стовпців у садці;  $\ell_{ст}$ ,  $h_{ст}$  – довжина та висота стовпця, м, відповідно.

Для садки, яку формують із стовпців з проміжками між ними, її загальна поверхня становить:

**Таблиця 1** – Розрахункові температурні режими випалення ПШВ у шестистовпчикової садці

Кількість проштовхувань пічних вагонеток на добу	Температура, К, на позиціях зони випалення				
	26	27	28	29	30
12	1760	1810	1840	1900	1930
13	1770	1820	1850	1910	1940
14	1780	1830	1870	1920	1950
15	1800	1850	1890	1940	1970
16	1820	1870	1910	1970	2000
17	1840	1890	1930	2000	2030
18	1860	1910	1970	2030	2070
19	1890	1940	2010	2070	2110
20	1920	1980	2060	2120	2160

Аналіз режимів, поданих у табл. 1, свідчить про можливість реалізації температурних режимів у діючих тунельних печах за темпом руху вагонеток, що становить сімнадцять проштовхувань на добу, із забезпеченням стабільної якості готової продукції.

$$F_{\Sigma} = F_{н,\Sigma} + F_{вн,\Sigma}, \quad (10)$$

де  $F_{н,\Sigma}$ ,  $F_{вн,\Sigma}$  – зовнішня та внутрішня поверхня стовпця садки напівфабрикату вогнетривів, що сприймає теплоту, м<sup>2</sup>, відповідно.

Обчислення масивності садки напівфабрикату вогнетривів виконують за критерієм Біо з використанням формули

$$Bi_i = \frac{\alpha_{\Sigma i} \cdot S_p}{\lambda_{м,i}}, \quad (11)$$

де  $S_p$  – розрахункова товщина стовпця садки, м;  $\lambda_{м,i}$  – коефіцієнт теплопровідності напівфабрикату, який відповідає його середній температурі для  $i$ -ої позиції зони випалення, кВт/(м·К); його значення визначають за експериментальними даними [11,12], а також шляхом розрахунків [13,14].

Згідно з викладеним методом було обчислено температурні режими випалення шестистовпчикової садки напівфабрикату периклазошпінелідних вогнетривів (ПШВ), які відповідають різним варіантам продуктивності тунельної печі для продукування магнезійних вогнетривів. При цьому за базовий варіант використовували середньостатистичний режим випалення ПШВ, що відповідає темпу руху, який становить п'ятнадцять проштовхувань пічних вагонеток на добу та дозволяє одержувати, як показує практика, вогнетриви стабільної якості, які задовольняють вимогам стандарту.

Розрахункові значення температури печі у зоні випалення наведено в табл. 1.

**Висновки.** Результати виконаних досліджень вказують на доцільність застосування запропонованого методу для розрахунків коригування температурного режиму тунельних печей, які працюють із змінною продуктивністю, для забезпечення стабільної якості готової продукції.

### Бібліографічний список

1. **Китаев, Б. И.** Теплообмен в шахтных печах [Текст] / Б. И. Китаев, Ю. Г. Ярошенко, В. Д. Сучков. – Свердловск : Metallurgy, 1957. – 279 с.
2. **Аверин, С. И.** Расчеты нагревательных печей [Текст] / С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, А. Ф. Кравцов и др.; под ред. Н. Ю. Тайца; учеб. пособие. – 2-е изд. испр. и доп. – Киев : Техника, 1969. – 540 с.
3. **Аббакумов, В. Г.** Конвективный теплообмен в туннельных печах [Текст] / В. Г. Аббакумов, Г. Ш. Ашкенадзе // Огнеупоры. – 1972. – № 3. – С. 20-27.
4. **Аббакумов, В. Г.** Теплотехническое сопоставление различных типов садки на вагонетках туннельных печей [Текст] / В. Г. Аббакумов // Огнеупоры. – 1966. – № 1. – С. 17-24.
5. **Аббакумов, В. Г.** Теплоотдача на продольных и торцевых поверхностях садки на печных вагонетках [Текст] / В. Г. Аббакумов // Огнеупоры. – 1967. – № 1. – С. 21-28.
6. **Аббакумов, В. Г.** Выбор величины продольных разрывов между садками изделий в туннельных печах [Текст] / В. Г. Аббакумов // Огнеупоры. – 1967. – № 4. – С. 13-16.
7. **Аббакумов, В. Г.** Расчет нагрева и охлаждения изделий в высокотемпературной туннельной печи [Текст] / В. Г. Аббакумов // Огнеупоры. – 1968. – № 2. – С. 16-22.
8. **Аббакумов, В. Г.** Обжиг сводовых огнеупоров при садке изделий одной марки [Текст] / В. Г. Аббакумов, Г. А. Тараканчиков, А. А. Шумилин // Огнеупоры. – 1971. – № 1. – С. 11-19.
9. **Михеев, М. А.** Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева; справочник. – 2-е изд. стереотип. – М.-Л. : Энергия, 1977. – 344 с.
10. **Кутателадзе, С. С.** Основы теории теплообмена [Текст] / С. С. Кутателадзе. – 5-е изд. доп. – М. : Атомиздат, 1979. – 415 с.
11. **Харченко, И. Г.** Теплофизические свойства магнизиальных огнеупоров в процессе обжига [Текст] / И. Г. Харченко, В. И. Иванов, В. С. Баздырев // Metallurgy and coke chemistry : темат. научн.-техн. сборник. – Киев : Техника, 1982. – Вып. 84. – С. 6-10.
12. **Харченко, И. Г.** Исследование комплекса теплофизических характеристик муллитокорундовых огнеупоров в процессе обжига [Текст] / И. Г. Харченко, В. И. Иванов, В. А. Скачков, В. Т. Березовский // Metallurgical and coke industry. – 1985. – № 4 (138). – С. 41-42.
13. **Миснар, А.** Теплопроводность твердых тел, жидкостей и газов и их композиций [Текст] / А. Миснар. – М. : Мир, 1968. – 463 с.
14. **Литовский, Е. Я.** Теплофизические свойства огнеупоров [Текст] / Е. Я. Литовский, Н. А. Пучкелевич ; справочник. – М. : Metallurgy, 1982. – 150 с.

**ИВАНОВ ВИКТОР ИЛЬИЧ**, старший научный сотрудник кафедры металлургии, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: vitas.1947@mail.ru

**НЕСТЕРЕНКО ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА**, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: tanesterenko@yandex.ru

**ЗИНЧЕНКО ВЛАДИМИР ЮРЬЕВИЧ**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: elehna.zinchenko@mail.ru

**ЧЕПРАСОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ**, кандидат технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: alex.i.cheprasov@gmail.com

### МЕТОД ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ОБЖИГА ПОЛУФАБРИКАТА ОГНЕУПОРОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

На основе решения дифференциального балансового уравнения теплообмена пластины в противотоке предложен метод инженерного расчета для коррекции температурного режима обжига полуфабриката огнеупоров в садке на печных вагонетках. Подробно изложены методики расчета коэффициентов теплоотдачи в действующих высокотемпературных туннельных печах. Расчеты по коррекции температурных режимов обжига позволяют обеспечить стабилизацию качественных показателей готовой продукции.

Ключевые слова: высокотемпературная туннельная печь, полуфабрикат огнеупоров, температурный режим обжига, уравнение теплообмена пластины в противотоке, коррекция расхода теплоносителя

**IVANOV VICTOR**, Senior Staff Scientist of Department of Metallurgy, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: vitas.1947@mail.ru

**NESTERENKO TATIANA**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Metallurgy, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: tan-nesterenko@yandex.ru

**ZINCHENKO VLADIMIR**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Automation of Flow Processes, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: eelna.zinchenko@mail.ru

**CHEPRASOV ALEXANDER**, Candidate of Technical Sciences, Professor of Department of Heat and Power Engineering, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: alex.i.cheprasov@gmail.com

### **METHOD OF ENGINEERING CALCULATION OF BURNING MODES FOR HALF-FINISHED PRODUCT OF REFRACTORY MATERIALS IN HIGH-TEMPERATURE TUNNEL FURNACES**

The method of engineering calculation for the correction of temperature mode of burning of half-finished product of refractory materials in charging on the furnace tubs on the basis of decision of differential balance equation of heat exchange of plate in backward flow is offered. The methods for calculation of heat transfer agent coefficients in operating tunnel furnaces in detail are stated. Calculations on the correction of the temperature modes of kinn roasting of magnesia refractories allow to stabilizing their quabilative factors.

Keywords: high-temperature tunnel furnace, half-finished product of refractory materials, mode of kiln roasting, backward flow, equation of heat exchange of plate, stabilization of quabilative factors

Стаття надійшла до редакції 23.02.2017 р.

Рецензент, проф. І.Г. Яковлева

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>