

В.І. Іванов <sup>(1)</sup>, ст. наук. співробітник

О.І. Чепрасов <sup>(1)</sup>, професор, к.т.н.

Ю.М. Радченко <sup>(2)</sup>, доцент, к.т.н.

О.А. Позднякова <sup>(1)</sup>, ст. викладач

## ДО ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ВВЕДЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ У ЗОНУ ВИПАЛЮВАННЯ ТУНЕЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ВОГНЕТРИВКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<sup>(1)</sup> Запорізька державна інженерна академія,

<sup>(2)</sup> Національна металургійна академія України, м. Дніпропетровськ

Предложен подход для оптимизации режимов ввода тепловой энергии в высокотемпературную зону туннельных печей для обжига огнеупоров. Результаты анализа использования топлива и его теплоты при существующем и разработанном режимах ввода тепловой энергии в туннельную печь для обжига муллитокорундовых огнеупоров свидетельствуют о повышении стабильности качественных показателей готовой продукции, которые удовлетворяют требованиям стандарта, а также снижению энергетических затрат при переводе данной печи на работу с постоянным уровнем температуры ( $\theta_{печ} = const$ ) в зоне обжига.

Запропоновано підхід для оптимізації режимів введення теплової енергії у високотемпературну зону тунельних печей для випалювання вогнетривів. Результати аналізу використання палива та його теплоти за існуючим і розробленим режимами введення теплової енергії до тунельної печі для випалювання мулітокорундових вогнетривів свідчать про підвищення стабільності якісних показників готової продукції, які задовольняють вимогам стандарту, а також зниження енергетичних витрат під час переведення даної печі на роботу з постійним рівнем температури ( $\theta_{печ} = const$ ) у зоні випалювання.

It is offered approach for optimization of the regimes for application of thermal energy in the high temperature zone of tunnel furnaces for burning of refractory's. Results of analysis about use of fuel and his warmth at existing and worked out regimes application energy in a tunnel furnace for burning of mullite-corungum refractory's formanced to the increase of stability of high-quality indexes of the finished products, which suit standard, and also decline of power const during work of this furnace with the permanent level of temperature ( $T_{st} = const$ ) in the zone of burning.

*Вступ.* Специфіка технологічного процесу виробництва вогнетривів передбачає проведення термічної обробки (випалювання) сирцю виробів у високотемпературних тунельних печах безперервної дії. З позицій впливу кінетики та механізму хіміко-мінералогічних перетворень, а також формування текстури виробів, на рівень технічних властивостей вогнетривів процес їх випалювання є найважливішою технологічною операцією.

Відомо, що перед випалюванням у печах зазначеного типу сирець вогнетривів завантажують на футерований під пічних вагонеток у багаторядкові садки, які формуються з окремих стовпчиків із зазорами. Вагонетки із розташованими на них садками сирцю вогнетривів періодично переміщують довжиною робочого каналу тунельної печі за допомогою механічного штовхача, що працює в автоматичному режимі.

Операція випалювання сирцю вогнетривів здійснюється під час їх знаходження на високотемпературній ділянці тунельної печі (зоні випалювання), що складається з

декількох позицій, які опалюються газоподібним паливом, переважно природним газом.

Практикою теплової роботи тунельних печей вогнетривкої промисловості [1] встановлено, що готову продукцію достатньої та стабільної якості можна сягати під час реалізації у зоні випалювання даних агрегатів температурно-часових режимів із заданим (близьким до максимального значення) та постійним на її окремих опалювальних позиціях рівнем температури ( $\theta_{печ} = \text{const}$ ). Проте для практичного створення у зоні випалювання тунельної печі зазначеного режиму термічної обробки існують певні складнощі щодо його забезпечення.

В той же час аналіз теплової діаграми процесу нагрівання сирцю вогнетривів на пічних вагонетках за режимом  $\theta_{печ} = \text{const}$ , яка відповідає залежності, що має вигляд:

$$\frac{P_j \cdot \Delta i_j}{(P_j \cdot \Delta i_j)_{\max}} = f(Fo_j), \text{ де } P_j, P_{j,\max} - \text{потужність і максимальна потужність тунельної}$$

печі на  $j$ -ій позиції зони випалювання відповідно;  $\Delta i_j, \Delta i_{j,\max}$  – змінювання теплової місткості та максимальної теплової місткості сирцю випалюваних вогнетривів і футерівки поду пічної вагонетки на  $j$ -ій позиції зони випалювання відповідно;  $Fo_j$  – критерій Фур'є на  $j$ -ій позиції зони випалювання, вказує на зменшення міри засвоєння ним теплоти на послідовно розташованих позиціях зони випалювання, що призводить до відповідного зниження витрати газоподібного палива (переважно природного газу) за її довжиною.

*Постановка задачі.* Завданням роботи є розробка методики розрахунку раціональних режимів введення теплової енергії у зону високих температур тунельної печі для випалювання сирцю вогнетривів за режимом  $\theta_{печ} = \text{const}$ .

*Основна частина досліджень.* Для реалізації зазначеного режиму роботи тунельної печі необхідно виконати перерозподіл її теплової потужності щодо довжини зони випалювання з використанням рівняння миттєвого теплового балансу.

Рівняння миттєвого теплового балансу для  $j$ -тої позиції зони випалювання тунельної печі можна записати як

$$M_{n.e,j} + M_{нов,j} = P_1 \cdot \Delta i_{1,j} + P_2 \cdot \Delta i_{2,j} + \sum M_{втр,j}, \quad (1)$$

де  $M_{n.e,j}$  – хімічна енергія газоподібного палива (природного газу), що подають до тунельної печі на  $j$ -тій позиції зони випалювання;  $M_{n.e,j} = Q_n^p \cdot G_{n.e,j} \cdot \eta_j$ ;  $Q_n^p$  – нижча теплота згоряння газоподібного палива;  $G_{n.e,j}, \eta$  – відповідно витрата палива та коефіцієнт використання його теплоти на  $j$ -тій позиції зони випалювання;  $M_{нов,j}$  – фізична теплота повітря, що подають для спалювання палива на  $j$ -тій позиції зони випалювання;  $P_1, P_2$  – потужність тунельної печі (індекси «1» і «2» позначають сирець випалюваних вогнетривів і футерівку поду пічної вагонетки відповідно);  $\Delta i_{1,j}, \Delta i_{2,j}$  – змінювання теплової місткості на  $j$ -тій позиції зони випалювання;  $\Delta i_{1,j} = \bar{c}_{1,j} \cdot (\bar{\theta}_{1,j}^k - \bar{\theta}_{1,j}^n)$ ;  $\Delta i_{2,j} = \bar{c}_{2,j} \cdot (\bar{\theta}_{2,j}^k - \bar{\theta}_{2,j}^n)$ ;  $\bar{c}_{1,j}, \bar{c}_{2,j}$  – середня теплова місткість на  $j$ -тій позиції зони випалювання;  $\bar{\theta}_{1,j}^n, \bar{\theta}_{2,j}^n, \bar{\theta}_{1,j}^k, \bar{\theta}_{2,j}^k$  – відповідно середні початкова та кінцева температура на  $j$ -тій позиції зони випалювання;  $\sum M_{втр,j}$  – втрати теплоти з продуктами згоряння палива, а також через футерівку бокових стін і склепіння пічного каналу, на  $j$ -тій позиції зони випалювання.

Для обчислення параметрів  $\bar{\theta}_{1,j}^n$ ,  $\bar{\theta}_{2,j}^n$  та  $\bar{\theta}_{1,j}^k$ ,  $\bar{\theta}_{2,j}^k$  запропоновано методику розрахунку теплообмінних процесів у зоні випалювання тунельної печі для системи «середовище, яке нагріває — футерівка пічного каналу — сирець випалюваних вогнетривів — футерівка поду пічної вагонетки».

Під час розробки даної методики вважали:

- наявність вісесиметричного поля температури бічної поверхні садки сирцю вогнетривів на окремих позиціях зони випалювання тунельної печі;
- відсутність подовжнього передавання теплоти до садки сирцю вогнетривів, окрім перенесення теплоти потоком продуктів згоряння пічним каналом;
- наявність теплової ізоляції бічної поверхні футерівки поду пічних вагонеток;
- нелінійну залежність теплофізичних характеристик сирцю вогнетривів та матеріалу футерівки поду пічних вагонеток від температури;
- наявність незначного впливу короткочасних простоїв тунельної печі під час перемішування вагонеток із садками сирцю вогнетривів щодо пічного каналу на теплообмінні процеси у зоні випалювання.

Зовнішній теплообмін у системі, яку розглядають, характеризували інтегральними величинами – коефіцієнтами тепловіддачі випромінюванням і конвекцією.

Після прийняття початкових припущень математичну постановку задачі у середовищі з постійною температурою печі подавали системою тримірних нелінійних диференціальних рівнянь теплопровідності:

- для області  $D_1 (0 \leq x \leq A_1; 0 \leq y \leq B_1; 0 \leq z \leq H_1; 0 \leq \tau \leq \tau_k)$

$$c_1 \cdot \rho_1 \frac{\partial \theta_1(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_1 \frac{\partial \theta_1(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda_1 \frac{\partial \theta_1(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_1 \frac{\partial \theta_1(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right]; \quad (2)$$

- для області  $D_2 (0 \leq x \leq A_2; 0 \leq y \leq B_2; 0 \leq z \leq H_2; 0 \leq \tau \leq \tau_k)$

$$c_2 \cdot \rho_2 \frac{\partial \theta_2(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_2 \frac{\partial \theta_2(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda_2 \frac{\partial \theta_2(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_2 \frac{\partial \theta_2(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right]; \quad (3)$$

– за крайових умов, що враховують складний характер теплообмінних процесів у зоні випалювання печі:

$$\theta_1(x, y, z, 0) = \bar{\theta}_{1,0}; \quad (4)$$

$$\theta_2(x, y, z, 0) = \bar{\theta}_{2,0}; \quad (5)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial \theta_1(0, y, z, \tau)}{\partial x} = \alpha_{k,1} \cdot [\theta_{z,c} - \theta_1(0, y, z, \tau)] - \alpha_{вип,1}^{z,c-\phi,n,k-c.с} \cdot [\theta_{z,c} - \theta_1(0, y, z, \tau)]; \quad (6)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial \theta_1(A_1, y, z, \tau)}{\partial x} = \alpha_{\kappa, \text{II}} \cdot [\theta_{z.c} - \theta_1(A_1, y, z, \tau)] - \alpha_{\text{випр, II}}^{z.c-\phi.n.\kappa-c.\theta} \cdot [\theta_{z.c} - \theta_1(A_1, y, z, \tau)] ; \quad (7)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial \theta_1(x, 0, z, \tau)}{\partial x} = \alpha_{\kappa, \text{III}} \cdot [\theta_{z.c} - \theta_1(x, 0, z, \tau)] - \alpha_{\text{випр, III}}^{z.c-\phi.n.\kappa-c.\theta} \cdot [\theta_{z.c} - \theta_1(x, 0, z, \tau)] \quad (8)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial \theta_1(x, B_1, z, \tau)}{\partial x} = \alpha_{\kappa, \text{IV}} \cdot [\theta_{z.c} - \theta_1(x, B_1, z, \tau)] - \alpha_{\text{випр, IV}}^{z.c-\phi.n.\kappa-c.\theta} \cdot [\theta_{z.c} - \theta_1(x, B_1, z, \tau)] ; \quad (9)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial \theta_1(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = \alpha_{\kappa, \text{V}} \cdot [\theta_{z.c} - \theta_1(x, y, 0, \tau)] - \alpha_{\text{випр, V}}^{z.c-\phi.n.\kappa-c.\theta} \cdot [\theta_{z.c} - \theta_1(x, y, 0, \tau)] ; \quad (10)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial \theta_1(x, y, H_1, \tau)}{\partial z} = \alpha_{\kappa, \text{VI}} \cdot [\theta_{z.c} - \theta_1(x, y, H_1, \tau)] - \alpha_{\text{випр, VI}}^{z.c-\phi.n.\kappa-c.\theta} \cdot [\theta_{z.c} - \theta_1(x, y, H_1, \tau)] ; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \theta_1(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{\partial \theta_2(x, y, 0, \tau)}{\partial z} ; \quad (12)$$

$$\frac{\partial \theta_2(A_2, y, H_2, \tau)}{\partial z} = \frac{\partial \theta_2(A_2, y, 0, \tau)}{\partial z} ; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \theta_2(x, y, H_2, \tau)}{\partial z} = 0 ; \quad (14)$$

$$\frac{\partial \theta_2(0, y, z, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial \theta_2(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = 0 ; \quad (15)$$

$$\frac{\partial \theta_2(A_2, y, z, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial \theta_2(x, B_2, z, \tau)}{\partial y} = 0 ; \quad (16)$$

$$\frac{\partial \theta_2(0, y, z, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial \theta_2(x, y_2, 0, \tau)}{\partial z} = 0 ; \quad (17)$$

$$\frac{\partial \theta_2(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = \frac{\partial \theta_2(x, y_2, 0, \tau)}{\partial z} = 0 , \quad (18)$$

де  $c_1, c_2$  – питома теплоємність;  $\rho_1, \rho_2$  – щільність;  $x, y, z, \tau$  – просторові та часова змінні відповідно;  $\lambda_1, \lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності;  $A_1, A_2$  – довжина;  $B_1, B_2$  – розрахункова ширина;  $H_1, H_2$  – висота;  $\alpha_{\text{випр, } i}^{z.c-\phi.n.\kappa-c.\theta}$ ,  $\alpha_{\kappa, i}$  – коефіцієнти тепловіддачі випромінюванням і конвекцією для  $i$ -ої ділянки садки сирцю вогнетривів, відповідно  $i \in [I; VI]$ ;  $\theta_{z.c}$  – температура гріючого середовища;  $\theta_1, \theta_2$  – температура поверхні;  $\bar{\theta}_{1, j-1}$ ,  $\bar{\theta}_{2, j-1}$  – середня температура на вході до зони випалювання печі.

Величину коефіцієнта тепловіддачі випромінюванням розраховують за відомою формулою [2]:

$$\alpha_{випр,i}^{z.c-\phi.n.k-c.e} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{зв} \cdot \frac{\theta_{z.c}^4 - \theta_1^4}{\theta_{z.c} - \theta_1}, \quad (19)$$

де  $\sigma_0$  – постійна Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_{зв}$  – зведений ступінь чорноти садки сирцю випалюваних вогнетривів.

Значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією визначають з використанням методики, що розроблено для печей даного типу [3].

Для чисельного вирішення нелінійної задачі (2)-(18) використовують кінцеворізничеву схему неявного вигляду із розщепленням за фізичними параметрами [4].

Далі з використанням рівняння (1) обчислюють раціональний розподіл газоподібного палива ( $G_j$ ) щодо довжини зони випалювання тунельної печі, який забезпечує реалізацію режиму  $\theta_{печ} = \text{const}$ :

$$G_j = \frac{P_1 \cdot \Delta i_{1,j} + P_2 \cdot \Delta i_{2,j} + \sum M_{випр,j} - M_{пов,j}}{\pi \cdot \phi \cdot k_j \cdot Q_n^p \cdot \eta_j}, \quad (20)$$

де  $G_j$  – витрата палива на  $j$ -тій позиції зони випалювання печі;  $\phi$  – коефіцієнт швидкості витікання палива;  $k_j$  – кількість пальників на  $j$ -тій позиції зони випалювання.

Відповідно до запропонованої методики виконано аналіз використання газоподібного палива та його теплоти у зоні високої температури тунельної печі ПАТ «Запоріжвогнетрив» під час випалювання за існуючим режимом і режимом  $\theta_{печ} = \text{const}$  сирцю мулітокорундових вогнетривів марки МКВН-72, якого завантажували на футерований під пічних вагонеток у садку із шести стовпчиків із зазорами.

**Таблиця 1** – Температура печі, витрата природного газу, тепла місткість сирцю випалюваних вогнетривів і футерівки поду вагонетки на позиціях зони випалювання

Параметр	Позиції зони випалювання				
	27	28	29	30	31
Температура печі, К	1773	1783	1793	1803	1813
	1793	1793	1793	1793	1793
Витрата природного газу, $10^{-3}$ , м <sup>3</sup> /с	39,8	40,5	42,0	43,5	40,2
	44,2	41,0	38,5	36,8	34,3
Теплова місткість сирцю вогнетривів, кДж/кг	149,2	138,6	126,8	118,4	112,6
	160,0	142,5	127,3	115,2	107,6
Теплова місткість футерівки поду пічної вагонетки, кДж/кг	133,9	124,0	118,5	114,2	109,6
	135,2	125,5	115,6	108,7	103,2

Примітка: у чисельнику - існуючий режим;  
у знаменнику - режим  $\theta_{печ} = \text{const}$

Зазначена тунельна піч обладнана чотирма основними та проміжними пальниками (діаметр газового сопла – 18 мм), які розміщено назустріч один одному відповідно на стику вагонеток позицій зони випалювання (№№ 27-31) та на середині зазначених позицій. Газоподібне паливо – природний газ ( $Q_n^p = 33,5$  МДж/м<sup>3</sup>), тривалість інтервалу між переміщенням вагонеток у пічному каналі  $\tau = 7,20 \cdot 10^3$  с, продуктивність:  $P_1 = 1,18$  кг/с,  $P_2 = 1,39$  кг/с, середня температура сирцю вогнетривів і футерівки пічної вагонетки на вході до зони випалювання  $\bar{\theta}_{1,j}^n = 1623$  К і  $\bar{\theta}_{2,j}^n = 1553$  К, на

виході із даної зони –  $\bar{\theta}_{1,j}^k = 1763$  К и  $\bar{\theta}_{2,j}^k = 1713$  К. Значення теплофізичних характеристик ( $c$ ,  $\rho$  і  $\lambda$ ) сирцю випалюваних мулітокорундових вогнетривів і матеріалу футерівки поду пічних вагонеток приймали за даними робіт [5,6]. Результати розрахунків наведено у табл. 1.

Для створення умов, що забезпечують реалізацію режиму  $\theta_{печ} = \text{const}$  у зоні випалювання, з використанням відомої інженерної методики [7] здійснювали обчислення діаметра газових сопел та зменшення його значень для основних пальників до 12 мм, для проміжних пальників – до 10 мм. Окрім того, виконано індивідуальне підведення первинного повітря до кожного пальника шляхом обладнання зони випалювання вентиляторами високого тиску типу ВВТ-9.

За подальших теплотехнічних досліджень на тунельній печі\* вивчали характер змінювання температури в об'ємі садки сирцю мулітокорундових вогнетривів. Температуру сирцю вогнетривів під час випалювання вимірювали за допомогою термоелектричних термометрів типу ВР-20/5 (із діаметром електродів 0,35 мм) у корундових чохлах, захищених інертним газом (аргоном). Датчики температури встановлювали на поверхні та у центральній частині стовпчиків із сирцю вогнетривів на різних ділянках садки. Оцінювання якісних показників випалених вогнетривів здійснювали шляхом розміщення на різних ділянках садки сирцю вогнетривів, що досліджували, контрольних зразків з однаковими початковими технологічними параметрами виготовлення.

Під час зіставлення результатів експериментального визначення температури мулітокорундових вогнетривів у зоні випалювання тунельної печі із результатами розрахунків поля температури вогнетривів, виконаних за розробленою методикою на ПЕОМ, встановлено їх достатню збіжність: значення максимального відхилення значень температури не перевищують  $\pm 7,5$  %.

**Таблиця 2** – Тепловий баланс зони випалювання тунельної печі до (I) та після (II) її модернізації

Найменування статей	I	II
Прихід теплоти, МДж (%):		
– хімічна енергія природного газу	5,61 (87,2)	5,14 (86,3)
– теплота нагрітого повітря	0,82 (12,8)	0,82 (13,7)
Разом	6,43 (100)	5,96 (100)
Витрата теплоти, МДж (%):		
– на нагрівання сирцю вогнетривів	2,60 (40,4)	2,60 (43,4)
– на акумуляцію футерівки поду пічних вагонеток	0,63 (9,8)	0,63 (10,0)
– фізична теплота продуктів згоряння, що відходять	2,65 (39,5)	2,21 (37,2)
– втрати через футерівку бічних стін і склепіння печі	0,55 (8,6)	0,55 (9,0)
– невраховані втрати	0,11 (1,7)	0,04 (0,4)
Разом	6,43 (100)	5,96 (100)
Коефіцієнт корисної дії печі	40,4	43,4
Питома витрата природного газу, м <sup>3</sup> /т	177,0	167,0
Коефіцієнт використання теплоти палива	0,57	0,65

Відповідно до аналізу розподілу температури у об'ємі садки сирцю мулітокорундових вогнетривів на пічній вагонетці, якого здійснювали по проведенні експериментів, зафіксовано значне підвищення її рівномірності поля після модернізації печі.

\* Дослідження виконано за участі В.Т. Березовського та Ю.М. Попкова (ПАТ «Запоріжвогнетрив»)

Так, значення максимального перепаду температури за висотою й шириною садки випалюваних вогнетривів знижується відповідно від 80...100 до 45...50 градусів та від 60...80 до 25...30 градусів, що є підтвердженням поліпшення умов випалювання нижніх рядів усіх стовпчиків садки вогнетривів, а також стовпчиків, які розташовано у середній частині садки.

Результати статистичної обробки значного масиву якісних показників випалених мулітокорундових вогнетривів до та після модернізації зони випалювання тунельної печі вказують на суттєве зниження коливань їх фізико-механічних характеристик та зміщення максимальної частоти значень у бік збільшення величини межі міцності під час стиснення та зменшення значення відкритої пористості.

Оцінювання економічності запропонованих заходів щодо поліпшення теплової роботи тунельної печі здійснювали шляхом складання за стандартною методикою [8] теплового балансу до та після модернізації її зони випалювання (табл. 2).

Як показують результати аналізу табл. 2, витрата теплоти у зоні випалювання тунельної печі під час її роботи за режимом  $\theta_{печ} = \text{const}$  порівняно з існуючим варіантом введення до неї енергії зменшується на 8,9 %, при цьому коефіцієнт корисної дії даної печі підвищується на 4,0 %, а питома витрата палива (природного газу) знижується на 5,6 %.

#### *Висновки.*

1. Розроблено методику розрахунку теплообмінних процесів у високотемпературній зоні тунельних печей для випалювання сирцю вогнетривів під час організації режиму введення теплової енергії за  $\theta_{печ} = \text{const}$ .

2. Реалізація зазначеного режиму роботи тунельної печі під час випалювання сирцю мулітокорундових вогнетривів забезпечує високі та стабільні якісні показники готової продукції, а також зниження витрати природного газу.

### **ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ**

1. *Цибин, И. П.* Пуск, наладка и теплотехнические испытания печей и сушил огнеупорной промышленности [Текст] / И. П. Цибин, М. З. Шварцман, В. В. Стрелотин. – М. : Металлургия, 1978. – 256 с. – Библиогр. : с. 254-255.
2. Теория, конструкция и расчет металлургических печей [Текст] Т. 2. Расчеты металлургических печей : учебник / Б. С. Мазурков ; под научн. ред. В. А. Кривандина. – 2-е изд. – М. : Металлургия, 1986. – 375 с. – Библиогр. : с. 372.
3. *Аббакумов, В. Г.* Конвективный теплообмен в туннельных печах [Текст] / В. Г. Аббакумов, Г. Ш. Ашкинадзе // Огнеупоры. – 1972. – № 3. – С. 20-27.
4. *Марчук, Г. И.* Методы расщепления [Текст] / Г. И. Марчук. – М. : Наука, 1988. – 262 с. – Библиогр. : с. 243-260. – ISBN 5-02-013783-9.
5. Определение комплекса теплофизических характеристик муллитокорундовых огнеупоров в процессе обжига [Текст] / И. Г. Харченко, В. И. Иванов, В. С. Баздырев и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1985. – № 4 (138). – С. 41-42.
6. *Литовский, Е. Я.* Теплофизические свойства огнеупоров [Текст] : справочник / Е. Я. Литовский, Н. А. Пучкевич. – М. : Металлургия, 1982. – 152 с. – Библиогр. : с. 140-142.
7. О расчете и компоновке горелочных устройств туннельных печей для обжига огнеупорных изделий [Текст] / И. Г. Харченко, В. И. Иванов, В. С. Баздырев, В. Т. Березовский // Металлургия : научные труды Запорожской государственной инженерной академии. – Запорожье : РИО ЗГИА. – 1999. – Вып. 2. – С. 112-116.
8. *Каплан, В. Г.* Методика испытаний нагревательных печей в черной металлургии / В. Г. Каплан, Э. И. Спивак. – М. : Металлургия, 1970. – 462 с. – Библиогр. : с. 460-461.