

dependencies TiO_2 particles and carrier of drying time and the basic parameters of the need for further experimental studies and design of industrial drying equipment.

Drying is the final stage of production of TiO_2 and characterized by large power consumption. The general scientific problem is to reduce the cost of thermal energy in the drying process. We know that it is spent on drying up to 25 % of global energy production. In modern conditions where increased energy use and, consequently, there is shortage of energy resources increasingly urgent question raised energy efficiency. Despite the already established principles of energy saving technology and drying technology, there is no unique solution implementation. Therefore the problem of solving problems of heat energy in obtaining dry fine powders is the actual goal and forms these studies.

Drying is a transient and a thermo-diffusion process where moisture content of material temperature and coolant change over time, so the development of optimal regimes drying and rational designs dryers should be aware of the specific kinetic laws governing the process and conditions of the simulation.

The calculation of the mathematical description of the process of final drying of fine particles of TiO_2 in the vortex flow of carrier proves that the removal of moisture adsorption limiting the effectiveness of the drying process. To intensify the drying and increased residual dry material necessary to increase the size of the heat flux drying agent.

Keywords: fine, particle, drying, model, physical model, process, powder, titanium dioxide.

References

1. Marchevskiy, V.M. and Grobovenko, Y.V. (2016). "The drying process of titanium dioxide", *International scientific journal*, no. 5, pp. 22–25.
2. Malakhov, M.M., Diachenko, S.V., Papush, E.G. and Klymenchuk, O.A. (2005). "Mathematical model of dry dispersed product in the active hydrodynamic layer", *Proc. of the higher education institutions. Food technology*, no. 2–3, pp. 97–102.
3. Ivanov, Y.H. (2012). "The drying fine material in the fluidized bed", *M.: Energy*, 126 p.
4. Aleksanyan, Y.Y., Tytova, L.M., Nuhmanov, A.K. (2014). "Simulation process of drying particulate material in a fluidized bed", *Technique and technology of food production*, no. 3 (34), pp. 96–100.
5. Dmytryev, V.M., and Serheeva, E.A. (2013). "Convective drying of polydisperse materials in devices swirling weighted layer", *Journal of Tambov State Technical University*, no. 3, pp. 602–606.

УДК 669.715:621.745.012

ПАНОВ Є. М., д.т.н., проф.; БОЖЕНКО М. Ф., к.т.н., доц.;
ДАНИЛЕНКО С. В., к.т.н., с.н.с.; БОЯНІВСЬКИЙ В. П., магістрант

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПЕРЕПЛАВКИ АЛЮМІНІЄВОГО БРУХТУ

Наведені результати розрахунків енергетичної ефективності печі місткістю 6 т, потужністю 600 кВт, для переплавки алюмінієвого брухту. Показано, що заміна теплоізоляції з пінодіатоміта на силікат кальція, а також влаштування двох форкамер замість однієї та зменшення терміну їх відкриття призводить до зменшення витрат теплоти в циклі плавки приблизно у 2 рази. Виконані розрахунки енергетичної та економічної ефективності перевodu печі з електричного нагріву на газовий, при цьому для газового нагріву витрати зменшуються на 9–10 % порівняно з електричним. Розроблена конструкція печі з нахиленим склепінням, для якої порівняно з традиційним зменшується термін плавки у середньому на 11 %, а ККД підвищується на 7 %.

Ключові слова: піч, алюмінієвий брухт, огороження, теплоізоляція, термін плавки, теплота, енергетична ефективність, електричний і газовий нагрів, ККД.

© Панов Є. М., Боженко М. Ф., Даниленко С. В., Боянівський В. П., 2017.

Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень. Стационарні печі, які споруджуються на алюмінієвих заводах для переплавки алюмінієвого брухту, конструктивно не відрізняються від міксерів для приготування до лиття алюмінію або його сплавів [1–4]. Такі печі можуть працювати на двох видах обігріву

– електричному та газовому. Робочий простір печі виконаний у вигляді футерованої прямокутної камери з подиною, боковими і торцевими стінками та склепінням. Камера має дві зони: нижню, де знаходиться алюміній після розплавлення завантаженого брухту, та верхню (без розплаву). В одній з бокових стінок розташовані форкамери, через які завантажується алюмінієвий брухт і знімається шлак, та летка для виливання алюмінію. Футеровка поверхонь наявних печей виконана послідовно з вогнетривких матеріалів (корунд, шамот), а теплоізоляція – з пінодіатоміту і азбесту для подини, торцевих і бокових стінок, та пінодіатоміту і вермикуліту для склепіння.

В роботі [5] наведена методика розрахунку енергетичного балансу печей для переплавки алюмінієвого брухту, в результаті можуть бути визначені термін плавки і необхідна потужність зовнішніх нагрівальних пристроїв. Розрахунки втрат теплоти зовнішніми огороженнями електричної печі наявної конструкції місткістю 6 т показали, що найбільше їх питоме значення характерно для сталевих листів, які закривають струмовідводи, і поверхонь закритих форкамер; далі за цим показником розташовуються торцеві і бокові стінки в розплаві, ці ж стінки вище рівня розплаву, подина та склепіння. Для оцінки енергетичної ефективності печі були виконані варіантні розрахунки, що відрізнялися від базового варіанту заміною теплоізоляції, розмірами і терміном відкриття форкамер. Показано, що часткова заміна теплоізоляції з пінодіатоміта на силікат кальція в конструкціях подини, склепіння, бокових і торцевих стінок призводить до зменшення тепловтрат через ці огороження приблизно на 25 %. Але найбільший ефект зі зниження теплових втрат досягається при зменшенні площі форкамер і терміну їх відкриття при знятті шлаку.

Метою статті є подальше підвищення енергетичної ефективності та удосконалення конструкції стаціонарних печей для переплавки алюмінієвого брухту.

Результати розрахунків енергоефективності печі при зміні теплоізоляції. Для визначеної або заданої потужності печі ($P_{\text{вст}}$, кВт) термін плавки (включає нагрів брухту до температури розплавлення, розплавлення і перегрів розплаву алюмінію до робочої температури) τ , год, визначається з рівняння енергетичного балансу, тобто

$$\tau = \frac{Q_{i\text{аао}} + Q_{i\text{е}} + Q_{i\text{ааао}} + (Q_{o,\text{а}} - Q_{o,\text{ф}} + Q_{o,\text{т}}) \tau_{\text{а}}^{\text{о}}}{(E_{\text{аіо}} - Q_{\text{аоо}}^{\text{аі}} - Q_{i}) \cdot 3600}, \quad (1)$$

де $Q_{\text{нагр}}$, $Q_{\text{пл}}$, $Q_{\text{перегр}}$ – кількість теплоти, що витрачається на нагрів брухту до температури розплавлення, його розплавлення, перегрів розплавленого алюмінію та твердих домішок до робочої температури, відповідно, кДж; $Q_{\text{ф.в}}$, $Q_{\text{ф.з}}$ – втрати теплоти через відкриті форкамери, через зовнішні поверхні закритих форкамер, відповідно, кВт; $Q_{\text{ф.п}}$ – витрати теплоти на нагрівання повітря, що всмоктується в робочий простір печі при відкритті форкамер, кВт; $\tau_{\text{в}}^{\text{ш}}$ – термін відкриття форкамер в періоді плавки для зняття шлаку, с; $Q_{\text{втр}}^{\text{зовн}}$ – втрати теплоти через зовнішні огороження печі (бокові і торцеві стінки, подину, склепіння), кВт; $Q_{\text{о}}$ – втрати теплоти через отвори, кВт.

Ряд величин, що входять в формулу (1), для печі місткістю 6 т не залежать від зміни теплоізоляції, тому їх брали за аналогією з [5]. Це, зокрема: $Q_{\text{нагр}} = 3.26 \cdot 10^6$ кДж; $Q_{\text{пл}} = 1.94 \cdot 10^6$ кДж; $Q_{\text{перегр}} = 0.574 \cdot 10^6$ кДж; $Q_{\text{ф.з}} = 4,3$ кВт; $Q_{\text{ф.в}} = 258$ кВт; $Q_{\text{ф.п}} = 754$ кВт (для одного з найкращих варіантів при модернізації печі – дві форкамери розмірами по 2 x 1, м²); $Q_{\text{о}} = 1,2$ кВт (для розміру отвору 0,13x 0,13 м x м).

Для теплоізоляційних шарів печі порівняно з базовою та зміненою конструкціями [5] повністю замінений азбестовий картон на мінеральну вату, також у деяких випадках зменшена товщина пінодіатоміта і збільшена товщина силікату кальція.

Теплові втрати огороженнями розраховували за окремою програмою, розробленою в НДЦ «Ресурсозберігаючі технології» КПІ ім. Ігоря Сікорського, що, зокрема, враховує зміну теплопровідності футеровочно-теплоізоляційних шарів унаслідок просочування їх розплавом алюмінію. Результати розрахунків для електричного та газового нагріву печі наведені в табл.1, при цьому дійсні теплові втрати огороженнями збільшені в 1,5 рази порівняно з теоретичними унаслідок зміни властивостей матеріалів упродовж експлуатації [5]. Також при визначенні втрат теплоти з поверхні сталевих листів, що закривають струмовідводи при електричному нагріву, температуру їх зовнішньої поверхні (200 °С) та густину теплового потоку (3695 Вт/м²) брали за розрахунками [5].

Аналіз результатів розрахунків показує, що при газовому нагріву теплові втрати огороженнями модернізованої печі зменшилися на 40 % порівняно з електричним. Це пояснюється відсутністю при газовому нагріву сталевих листів, що закривають струмовідводи при електричному нагріву. Дійсні сумарні теплові втрати при електричному нагріву в порівнянні з базовим варіантом зменшилися на 39 %, і порівняно з найкращим модернізованим варіантом [5] – на 9 %.

Таким чином, обчислений за формулою (1) термін плавки для модернізованої печі потужністю 600 кВт склав $\tau_e = 3,92$ год при електричному нагріву (виготовлення нагрівачів з ніхромової стрічки) і $\tau_r = 3,78$ год при газовому нагріву. При збільшенні встановленої потужності печі до 1000 кВт термін плавки складає 2,25 год при електричному нагріву (виготовлення нагрівачів зі сталі ЕИ-626) і 2,2 год при газовому нагріву.

Для печі наявної конструкції при величині втрат теплоти через зовнішні огороження ($Q_{\text{втр}}^{\text{зовн}}$) 91,4 кВт при електричному нагріву і 72,1 кВт при газовому, терміну відкриття однієї форкамери розміром 4 x 1, м² при знятті шлаку в 1 год, та таких же як і для модернізованого варіанта печі інших величинах, що входять до формули (1), термін плавки складав 5,15 год при електричному нагріву і 4,96 год – при газовому.

У порівнянні з базовим варіантом для зміненої теплоізоляції, наприклад, при електричному нагріву термін плавки зменшився на 28 %, і порівняно з найкращим модернізованим варіантом [5] – на 2 %.

Витрати теплоти на компенсацію втрат огороженнями печі, кВт·год, визначали за формулою

$$Q_{\text{втр}} = \sum Q_{\text{втр},i} \tau_i,$$

де $Q_{\text{втр},i}$ – дійсні втрати теплоти через окремі огороження, кВт; τ_i – термін плавки, год.

Результати розрахунків (табл. 2) показують, що при електричному нагріву при встановленій потужності печі 600 кВт для модернізованої конструкції (при зміні теплоізоляційних шарів та влаштуванні двох форкамер розмірами по 2 x 1, м², з терміном їх відкриття по 30 хв. кожна) порівняно з базовою конструкцією теплоізоляції та однією форкамерою розміром 4 x 1, м², з терміном її відкриття 60 хв., витрати теплоти зменшилися приблизно на 66 %. При цьому зменшення витрат теплоти відбулося на 45 % за рахунок зменшення терміну відкриття форкамер і на 21 % – за рахунок зміни теплоізоляційних шарів. Для зміненої конструкції печі при газовому нагріві порівняно з електричним витрати теплоти на компенсацію втрат огороженнями зменшилися на 9 %. Таким чином, газовий нагрів печі з енергетичної точки зору є більш ефективним ніж електричний.

Оцінка економічної ефективності переводу печей з електричного на газовий нагрів. При електричному нагріву печі витрата на електричну енергію в циклі плавки, грн/цикл, з урахуванням терміну витримки розплаву та лиття алюмінієвих виробів ($\tau_{\text{л}}$), визначається за формулою

$$B_e = [P_{\text{вст}} \tau_e + (Q_{\text{втр}}^{\text{зовн}} + Q_o) \tau_{\text{л}}] C_e \quad (2)$$

де C_e – вартість 1 кВт·год електроенергії, грн.

Беремо $\tau_{\text{л}} = 1$ год, $C_e = 1,29$ грн / кВт·год, тоді для печі зміненої конструкції потужністю 600 кВт з урахуванням визначених вище величин τ_e , $Q_{\text{втр}}^{\text{зовн}}$, Q_o , згідно з формулою (2) витрата на електричну енергію складе $B_e = 3115$ грн / цикл.

При газовому нагріву витрата на природний газ в циклі плавки, грн/цикл, також з урахуванням терміну витримки розплаву та лиття алюмінієвих виробів ($\tau_{\text{л}}$), визначається за формулою

$$B_r = \frac{K_3}{Q_{\text{н}}^c \eta_{\text{в.п}}} [P_{\text{вст}} \tau_r + (Q_{\text{втр}}^{\text{зовн}} + Q_o) \tau_{\text{л}}] 3600 \cdot C_r \quad (3)$$

де K_3 – коефіцієнт нерівномірності витрати палива (для печей періодичної дії дорівнює 1,2 – 2,0; для печей безперервної дії – 1,1 – 1,2); $Q_{\text{н}}^c$ – нижча теплота згоряння природного газу на суху масу, кДж / м³; $\eta_{\text{в.п}}$ – коефіцієнт використання палива; C_r – вартість 1 м³ природного газу, грн.

Таблиця 1 – Вихідні дані і результати розрахунків теплових втрат огороженнями печі зміненої конструкції

Огороження	Поверхня $F, \text{ м}^2$	Матеріали/товщини шарів (мм)						Теплові Втрати Q , кВт
		1	2	3	4	5	6	
Подина	70,3	$\frac{\text{К}}{250}$	$\frac{\text{ПШ}}{70}$	$\frac{\text{Ш}}{230}$	$\frac{\text{ПД}}{180}$	$\frac{\text{СК}}{300}$	$\frac{\text{МВ}}{20}$	9,63
Склепіння	72,7	$\frac{\text{Ш}}{65}$	$\frac{\text{ПД}}{65}$	$\frac{\text{СК}}{600}$	$\frac{\text{В}}{228}$	$\frac{\text{МВ}}{20}$	-	7,78

Огородження	Поверхня $F, \text{ м}^2$	Матеріали/товщини шарів (мм)						Теплові Втрати $Q,$ кВт
		1	2	3	4	5	6	
Бокова задня стінка в розплаві	3,6	$\frac{\text{К}}{250}$	$\frac{\text{ПШ}}{50}$	$\frac{\text{Ш}}{230}$	$\frac{\text{ПД}}{180}$	$\frac{\text{СК}}{270}$	$\frac{\text{МВ}}{20}$	0,53
Торцова стінка в розплаві	1,4	$\frac{\text{К}}{250}$	$\frac{\text{ПШ}}{70}$	$\frac{\text{Ш}}{115}$	$\frac{\text{ПД}}{115}$	$\frac{\text{СК}}{230}$	$\frac{\text{МВ}}{20}$	0,26
Торцова стінка вище розплаву	18,4	$\frac{\text{Ш}}{295}$	$\frac{\text{СК}}{485}$	$\frac{\text{МВ}}{20}$	-	-	-	2,37
Бокові стінки вище розплаву	$\frac{21,9(\text{е})}{27,8(\text{г})}$	$\frac{\text{Ш}}{295}$	$\frac{\text{СК}}{440}$	$\frac{\text{МВ}}{20}$	-	-	-	$\frac{3,07(\text{е})}{3,91(\text{г})}$
Теоретичні теплові втрати, $Q_{\text{т.втр}}^{\text{зовн}}$	$\frac{188,3(\text{е})}{194,2(\text{г})}$	-						$\frac{23,64(\text{е})}{24,48(\text{г})}$
Закриті форкамери, $Q_{\text{ф.з}}$	4,0	-						4,3
Сталеві листи, що закривають струмовідводи, $Q_{\text{ст}}$	$\frac{5,9(\text{е})}{0(\text{г})}$	-						$\frac{21,8(\text{е})}{0(\text{г})}$
Дійсні суммарні теплові втрати огороженнями, $Q_{\text{втр}}^{\text{зовн}}$	198,2	-						$\frac{61,56(\text{е})}{41,02(\text{г})}$

Умовні позначення: К – корундова вогнетривка цегла; ПШ – порошок шамотний; Ш – шамот; ПД – пінодіатоміт; СК – силікат кальцію; МВ – мінеральна вата; В – вермикуліт.
е – електричний нагрів; г – газовий нагрів.

Таблиця 2 – Розподіл витрат теплоти для компенсації втрат через огороження для печі місткістю 6 т в циклі плавки алюмінієвого брухту при встановленій потужності 600 кВт

Поверхня міксера	Значення витрат теплоти для варіантів					
	Базова конструкція (е)		Змінена конструкція (е)		Змінена конструкція (г)	
	кВт·год	%	кВт·год	%	кВт·год	%
Подина	139,8	9,4	56,6	7,5	54,6	8,0
Бокові і торцеві стінки	224,9	15,1	138,0	18,4	76,9	11,2
Скеління	106,6	7,2	45,8	6,1	44,1	6,4
Відкриті форкамери	1012	67,9	506	67,4	506	73,7
Отвори	6,2	0,4	4,7	0,6	4,5	0,7
Всього	1489,5	100	751,1	100	686,1	100

Коефіцієнт використання палива пов'язаний з втратами теплоти з димовими газами, що відходять, а також втратами теплоти від хімічного недопалу.

Приймаючи втрати теплоти від хімічного недопалу для газоподібного палива такими, що дорівнюють нулю, визначається коефіцієнт використання палива

$$\eta_{\text{вп}} = (100 - q_2)/100,$$

де q_2 – втрати теплоти з димовими газами, що відходять, %.

Величина q_2 , %, визначається за наступною формулою [6]

$$q_2 = (m + n\alpha_b) \frac{\theta_b - t_n}{100},$$

де m і n – постійні коефіцієнти, які для природного газу складають 0,9 і 3,25 відповідно; α_b – коефіцієнт надлишку повітря з урахуванням підсмоктування (при спалюванні природного газу $\alpha_b = 1,10$); θ_b – температура димових газів, що відводяться, °С (наприклад, її можна прийняти $\theta_b = t_{p,b} + 100$, °С, де $t_{p,b}$ – робоча температура в міксері, при якій здійснюється лиття алюмінію); t_n – температура навколишнього повітря, °С.

При $t_{p,b} = 700$ °С; $t_n = 20$ °С величина $q_2 = 35$ %, а коефіцієнт використання палива $\eta_{b,\Pi} = 0,65$.

Беремо $K_3 = 1,2$; $Q_H^\circ = 37560$ кДж/м³ (для газопроводу Середня Азія – Центр); $\Pi_r = 6,879$ грн / м³; для печі потужністю 600 кВт з урахуванням визначених вище величин, що входять в формулу (3), витрата на природний газ складе $V_r = 2800$ грн/цикл.

Таким чином використання газового нагріву порівняно з електричним економічно більш ефективно, оскільки витрати на природний газ в циклі плавки для модернізованої печі потужністю 600 кВт зменшуються приблизно на 10 %.

Аналогічні розрахунки виконані і для печі наявної конструкції. при цьому витрата на електроенергію складе 4100 грн/цикл, а на природний газ – 3700 грн/цикл. Таким чином і для печі наявної конструкції при використанні газового нагріву економічні витрати зменшуються на 10 %.

Розробка удосконаленої конструкції печі. Енергетична ефективність роботи печі характеризується коефіцієнтом корисної дії (ККД) та терміном плавки.

ККД печі, %, визначається за формулою

$$\eta = (Q_{\text{кор}} / P_{\text{вст}}) 100,$$

де $Q_{\text{кор}}$ – теплота, що корисно використовується в печі, кВт.

$$Q_{\text{кор}} = P_{\text{вст}} - Q_{\text{втр}},$$

де $Q_{\text{втр}}$ – сумарні втрати теплоти в печі, кВт.

$$Q_{\text{втр}} = (Q_{\text{втр}}^{\text{зовн}} - Q_{\text{фз}}) + Q_o + Q_{\text{фз}} \frac{\tau - \tau_b^{\text{III}}}{\tau} + Q_{\text{фв}} \frac{\tau_b^{\text{III}}}{\tau}$$

Поряд з таким фактором, як втрати теплоти, на термін плавки і ККД, очевидно, буде впливати і об'єм печі (внутрішній та зовнішній) при заданій місткості по алюмінію.

Введемо поняття так званої корисної теплової напруги робочого простору печі (q_v , кВт/м³) – ця величина використовується, наприклад, при аналізі роботи топочних камер котлів.

$$q_v = Q_{\text{кор}} / V_{\text{вн}},$$

де $V_{\text{вн}}$ – внутрішній об'єм робочого простору печі, м³.

Кількість теплоти, кДж, яка використовується в печі корисно, визначається за формулою

$$Q_{\text{кор } \tau} = Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{перегр}}.$$

З іншого боку, ця ж кількість теплоти може бути визначена із співвідношення

$$Q_{\text{кор } \tau} = A q_v \tau V_{\text{ал}} 3600, \quad (4)$$

де A – параметр, який залежить від конструктивних і теплофізичних властивостей футеровочно-теплоізоляційних матеріалів та температурно-теплових умов проведення плавки; $V_{\text{ал}}$ – об'єм алюмінієвого брухту, що завантажується в піч, м³.

$$V_{\text{ал}} = m_{\text{ал}} / \rho_{\text{ал}},$$

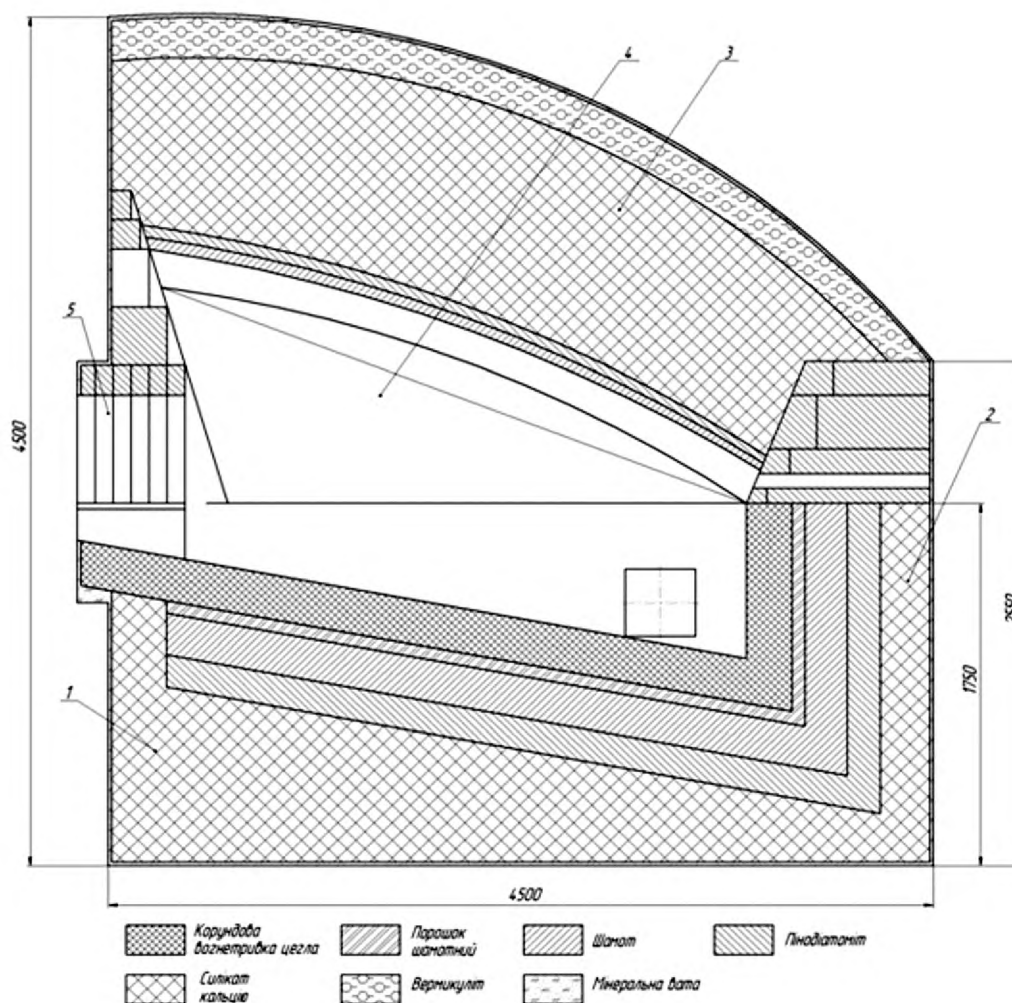
де $m_{\text{ал}}$ – маса алюмінієвого брухту, кг; $\rho_{\text{ал}}$ – густина алюмінію, кг / м³.

Для $m_{\text{ал}} = 6000$ кг та $\rho_{\text{ал}} = 2650$ кг / м³ величина $V_{\text{ал}} = 2,264$ м³.

Співвідношення (4) в кінцевому підсумку використовується для визначення терміну плавки τ , зменшення якого може бути досягнуто при збільшенні корисної теплової напруги робочого простору печі q_v за рахунок зменшення внутрішнього об'єму $V_{\text{вн}}$ (див. рис., де наведена конструкція міксера з нахиленим склепінням).

Для перевірки вірності визначення терміну плавки алюмінію за формулою (4) скористаємося іншою методикою, використовуючи рівняння енергобалансу відносно корисної витрати кількості теплоти в печі, тобто

$$Q_{\text{кор } \tau} = (P_{\text{вст}} - Q_{\text{втр}}) \tau 3600 \quad (5)$$



1 – подина; 2 – бокова задня стінка; 3 – склепіння; 4 – робочий простір; 5 – форкамера

Рис. – Міксер з нахиленим склепінням (поперечний переріз)

Втрати теплоти визначимо з наступного рівняння

$$Q_{\text{втр}} = q_0 V_{\text{зн}} (t_p - t_{\text{зовн}}), \quad (6)$$

де q_0 – питома теплова характеристика печі, кВт/(м³·К); $V_{\text{зн}}$ – зовнішній об'єм печі, м³; t_p і $t_{\text{зовн}}$ – відповідно температура в робочому просторі печі і навколишнього повітря, °С.

Питома теплова характеристика печі розраховується зі співвідношення, яке рекомендується в опалювальній техніці для визначення питомої теплової характеристики будівель

$$q_0 = q_o = \frac{P}{S} [k_{\text{ст}} + \rho_o (k_{\text{ф.в}} - k_{\text{ст}})] + \frac{1}{H} (n_1 k_{\text{скл}} + n_2 k_{\text{под}}),$$

де P – периметр печі, м; S – площа поверхні, м²; H – висота, м; ρ_o – коефіцієнт, що характеризує відношення площі форкамер до площі вертикальних зовнішніх стін; $k_{\text{ст}}$, $k_{\text{ф.в}}$, $k_{\text{скл}}$, $k_{\text{под}}$ – коефіцієнти теплопередачі для вертикальних стін, відкритих форкамер, склепіння і подини відповідно; n_1 і n_2 – поправкові коефіцієнти на розрахунок різниці температур для склепіння і подини.

Для отримання величини q_0 необхідно проведення детальних експериментів на печах різної місткості, конструкції футеровки, а також їх внутрішніх і зовнішніх об'ємів. Тому для оцінкових розрахунків величини q_0 для наявної печі визначаємо з рівняння (6), а для печі з нахиленим склепінням – за виразом

$$q_{0,\text{н}} = q_0 (V_{\text{зн.н}} / V_{\text{зн}})^{0,5},$$

де $V_{\text{зн.н}}$ і $V_{\text{зн}}$ – зовнішні об’єми печі з нахиленим склепінням та наявної конструкції відповідно, м^3 .

Розрахунки для печі наявної конструкції та зі зміненою теплоізоляцією з типовим та нахиленим склепінням при газовому нагріву наведені в табл. 3. При цьому за кресленнями визначали внутрішній та зовнішній об’єми печі: при типовому склепінні – $V_{\text{вн}} = 71 \text{ м}^3$, $V_{\text{зн}} = 265 \text{ м}^3$ (однакові для наявної конструкції та зі зміненою теплоізоляцією); при нахиленому склепінні – $V_{\text{вн.н}} = 55,8 \text{ м}^3$, $V_{\text{зн.н}} = 232 \text{ м}^3$ (однакові для наявної конструкції та зі зміненою теплоізоляцією). Параметр А для печі наявної конструкції і зі зміненою теплоізоляцією визначали при типовому склепінні за формулою (4), в якій термін плавки τ брали 4,96 год для печі наявної конструкції і 3,78 год – зі зміненою теплоізоляцією; для печі з нахиленим склепінням цей параметр брали анологічним для кожного з варіантів відповідно. Величина $t_p = 850 \text{ }^\circ\text{C}$, а $t_{\text{зовн}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблиця 3 – Порівняльні характеристики енергетичної ефективності печей потужністю 600 кВт

Найменування величини	Базова конструкція		Зі зміненою теплоізоляцією	
	Типове склепіння	Нахилене склепіння	Типове склепіння	Нахилене склепіння
Корисно використана теплота $Q_{\text{кор.т}}$, кДж	$5,774 \cdot 10^6$			
Сумарні втрати теплоти $Q_{\text{втр}}$, кВт	276,5	227	175,7	144,4
Корисна потужність печі $Q_{\text{кор.п}}$, кВт	323,5	373	424,3	455,6
Корисна теплова напруга робочого простору q_v , кВт/ м^3	4,56	6,68	5,98	8,16
Параметр А	31,3		31,3	
Питома теплова характеристика q_o , кВт/ $(\text{м}^3 \cdot \text{К})$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$0,75 \cdot 10^{-3}$
Термін плавки τ , год	4,96	-	3,78	-
- формула (4)	-	3,40	-	2,80
- формула (5)	-	4,30	-	3,50
ККД печі, %	53,9	62,1	69,7	75,9

З отриманих розрахунків видно, що для печі базової конструкції з нахиленим склепінням порівняно з типовим термін плавки мінімально зменшується на 14 %, а ККД збільшується на 8,2 %. Ці показники для печі зі зміненою теплоізоляцією складають 8 і 6,2 % відповідно.

Висновки

1. Повна або часткова заміна теплоізоляції з пінодіатоміта на силікат кальція, а також влаштування двох форкамер замість однієї (при однаковій площі) зі зменшенням терміну їх відкриття у 2 рази, призводять до зменшення витрат теплоти в циклі плавки алюмінієвого брухту, наприклад, при електричному нагріву, приблизно на 66 %.

2. Для модернізованої печі зі зміненою теплоізоляцією при газовому нагріву витрати теплоти на компенсацію втрат огороженнями зменшуються на 9 % порівняно з електричним нагрівом.

3. Переведення печі базової конструкції і зі зміненою теплоізоляцією з електричного нагріву на газовий сприяє зменшенню експлуатаційних витрат в циклі плавки приблизно на 10 %.

4. Створення печі з нахиленим склепінням порівняно з традиційним призводить до зменшення терміну плавки на 8–14 % та підвищенню ККД на 6,2–8,2 %

Список використаної літератури

1. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / Е. Н. Панов, Г. Н. Васильченко, С. В. Даниленко и др.; под общ. ред. Б. С. Громова. – М.: Руда и металлы, 1998. – 256 с.
2. Панов Е. Н. Изучение тепловых условий работы миксеров для приготовления и литья алюминиевых сплавов вместимостью 50 т / Е. Н. Панов, С. В. Даниленко, М. Ф. Боженко и др. // т Цветные металлы. – 1995. – № 1. – С. 43–45.
3. Панов Е. Н. Энергетическая эффективность работы миксеров для алюминия / Е. Н. Панов, М. Ф. Боженко, С. В. Даниленко // Цветные металлы. – 2000. – № 5. – С. 84–87.
4. Повышение энергетической эффективности газовых литейных миксеров емкостью 25 т / Е. Н. Панов, М. Ф. Боженко, Г. Н. Васильченко и др. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – № 6. – С. 19–23.
5. Повышение энергетической эффективности печей (миксеров) для переплавки алюминиевого лома / Е. Н. Панов, М. Ф. Боженко, М. В. Коржик и др. // Цветные металлы. – 2005. – № 5–6. – С. 114–117.

6. Зах Р. Г. Котельные установки / Р. Г. Зах. – М. : Энергия, 1968. – 352 с.

Надійшла до редакції 10.09.2016

Panov E. M., Bozhenko M. F., Danilenko S. V., Boianivskyi V. P

OPTIMIZATION OF FURNACES DESIGN FOR MELTING ALUMINIUM SCRAP

There are results of furnace energy efficiency calculations with a capacity of 6 tons and 600 kW power, for melting aluminum scrap. Designated heat loss by external protections and power consumption to their compensation, the melting term and efficiency of basic and modernized furnace design at electric and gas heating. It is shown that the upgraded structure (the replacement of thermal insulation on pinodiatomita calcium silicate) thermal losses protections under heating gas decreased by 40 % compared to electric. It is explained by the lack of gas in the heating of steel sheets that cover the current lead with electric heating. Valid total thermal losses, such as electric heating in compared with the baseline option decreased by 39 %. When replacing thermal insulation in modernized design and setting two prechambers size of 2 x 1 m², for a period of the opening 30 minutes, each compared to the basic design of the thermal insulation and one prechamber size 4 x 1 m², for a period of the opening 60 minutes, heat consumption decreased by 66 %. The decrease in spending of heat was 45 % due to reduction of the opening prechambers and 21 % – by changing the insulating layers. For the modernized design of the furnace at the gas heating compared with electric the heat consumption for compensation of protection losses decreased by 9 %, otherwise speaking gas heating furnace from the energy point of view is more efficient than electric. The melting term of modernized furnace 600 kW was 3,92 hrs. at electric heating (production of heaters nichrome tape) and 3,78 hrs. at the gas heating furnace and for existing designs these indicators made up to 5,15 and 4,95 hrs., respectively. By increasing the installed capacity of the modernized furnace to 1000 kW melting period is 2,25 hrs. at electric heating (heaters manufacturing steel EY-626) and 2,2 hours at gas heating. There are made calculations of economic efficiency transfer furnace of electric to gas heating. It is shown that the today tariffs in Ukraine for electricity and natural gas for modernized furnace designs 600 kW of electricity expense in one cycle of melting aluminum scrap is 3115 UAH and gas – 2800 UAH. For furnaces existing design this figures are 4100 and 3700 UAH respectively, that use gas heating in compared to the electric economically more efficiently because operating costs for natural gas in the cycle of melting for modernized and existing furnace 600 kW decreased by approximately 9–10 % compared to the cost of electricity. It is established that the melting term of furnace efficiency at the given capacity of aluminum, along with heat losses, and affect its volume (internal and external). In the analysis was using values of so-called useful thermal tension of working space and the specific thermal characteristics of furnace. The design of the inclined furnace arch, for which the internal volume reduced from 71 to 55,8 m³ and external – from 265 to 232 m³. It is shown that the inclined furnace arch with altered thermal insulation with gas heating in compared with typical arches of the total heat losses decreased from 175,5 to 144,4 kW. Useful furnace power increased from 424,3 to 455,6 kW. Useful thermal tension workspace increased from 5,98 to 8,16 kW/m³, melting period decreased on average by 11 % and the efficiency furnaces increased by 7 %.

Keywords: furnace, aluminum scrap, enclosure, thermal insulation, melting term, heat, energy and economic efficiency, electric and gas heating, useful thermal tension, specific thermal characteristic, efficiency.

References

1. Panov, E.N., Vasil'chenko, G.N., Danilenko, S.V. et al. (1998). *Teplovye processy v jelektrolizerah i mikserah aljuminievogo proizvodstva* [Thermal processes in aluminum production electrolyzers and mixers], Ruda i metally, Moscow.
2. Panov, E.N., Danilenko, S.V., Bozhenko, M.F. et al. (1995). *Izuchenie teplovyh uslovij raboty mikserov dlja prigotovlenija i lit'ja aljuminievyh splavov vmestimost'ju 50 t* [The study of the thermal conditions of work mixers for the preparation and casting of aluminum alloys, with a capacity of 50 tons], Cvetnye metally, no. 1. p. 43–45.
3. Panov, E.N., Bozhenko, M.F., Danilenko S.V. (2000). *Jenergeticheskaia jeffektivnost' raboty mikserov dlja aljuminija* [Energy efficiency mixers for aluminum], Cvetnye metally, no 5. p. 84–87.
4. Panov, E.N., Bozhenko, M.F., Vasil'chenko, G.N. et al (2007). "Improving the energy efficiency of gas mixers casting capacity of 25 tons", *Jekotehnologii i resursosberezhenie*, no. 6. p.19–23.
6. Panov, E.N., Bozhenko, M.F., Korzhik, M.V. et al (2005). "Improving the energy efficiency of furnaces (mixers), for remelting of aluminum scrap", *Cvetnye metally*, no. 5. p. 114–117.
7. Zakh, R.G. (1968), "Boilers", Moscow.