

ПАНОВ Є. М., д.т.н., проф.; БОЖЕНКО М. Ф., к.т.н., доц.;  
ДАНИЛЕНКО С. В., к.т.н., с.н.с.; НАВОЗЕНКО А. П., магістрант  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ТЕМПЕРАТУРНО-ТЕПЛОВІ ПОКАЗНИКИ ГАЗОПОЛУМЕНЕВОГО ОБПАЛЕННЯ АЛЮМІНІЄВИХ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРІВ

Наведені результати узагальнення досліджень газополуменевого обпалення електролізерів з анодами, що самовипалюються, на силу струму 130 кА, стосовно середніх за об'ємом температур подини та швидкостей зміни цих температур. Запропоноване безрозмірне рівняння для розрахунку середньої температури подини для будь-якого проміжку часу від початку обпалення за відомої витрати природного газу та температури поверхні подини. Визначені показники енергетичної ефективності й розроблена технологічна інструкція для газополуменевого обпалення електролізерів.

**Ключові слова:** алюмінієвий електролізер, подина, газополуменеве обпалення, енергетична ефективність.

© Панов Є. М., Боженко М. Ф., Даниленко С. В., Навоженко А. П., 2016.

**Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень.** Одним з етапів підготовки алюмінієвих електролізерів до пуску після їх капітального ремонту або спорудженні нових є процес обпалення. Основне завдання обпалення полягає в коксуванні набивних вуглецевих міжблочних і периферійних швів подини для надання їй монолітності, прогріванні катодного та анодного пристроїв до температур, що наближені до експлуатаційних, а також формуванні нового анода, що самовипалюється (у разі відсутності готового). Набивання швів подини здійснюють гаряченабивними та холоднабивними масами, які відрізняються температурою утворення структури напівкоксу. Для перших вона становить 350...450 °С, для других – 250...375 °С.

Для обпалення подин використовують джоулеву теплоту постійного електричного струму, що підводиться до подини крізь шар металу (обпалення на металі), коксовий дріб'язок чи алюмінієву стрічку (обпалення на опорі) або продукти згоряння рідкого чи газоподібного палива (полуменеве обпалення).

У працях [1–4] проаналізовані результати досліджень температурно-теплових полів і режимних параметрів обпалення великої кількості алюмінієвих електролізерів з анодами, що самовипалюються, та обпаленими анодами, джоулевою теплотою (на металі та опорі) та полуменевому способі під час спалювання в обпалювальних установках рідкого палива. За результатами цих досліджень встановлені показники, що необхідно досягти під час обпалення: кінцева температура поверхні центральної частини подини – близько 800 °С (середня за об'ємом – не нижче 700 °С); коефіцієнт нерівномірності температурного поля подини – не вище 0,12...0,15; темп нагрівання подини під час утворення напівкоксу – не вище 10 °С/год (оптимальне значення 6...7 °С/год); тривалість обпалення – 2,5...3,0 доби; затрати енергії на обпалення – оптимальні.

Виконаний у праці [4] порівняльний аналіз результатів досліджень засвідчив, що обпалення джоулевою теплотою на металі хоча й характеризується невеликими трудозатратами і простотою, але, реалізуючи його, неможливо досягти необхідних кінцевих температур подини, рівномірності її нагріву та регулювати теплопідвод. При обпаленні на опорі можна досягти необхідної температури подини, але складно забезпечити рівномірне температурне поле.

За полуменевого способу існує можливість регулювання темпів нагрівання подини й рівномірності температурного поля. Наприклад, у разі використання промислових рідкопаливних установок HOTWORK для обпалення електролізерів із випаленими анодами протягом 45...72 год досягнуті середні за об'ємом температури подини 611...830 °С. Швидкість нагрівання в температурному інтервалі утворення напівкоксу становила 7...13 °С/год (у середньому 10 °С/год), коефіцієнт нерівномірності температурного поля – 0,03...0,13 [3–4]. Але полуменевий спосіб характеризувався більшою трудомісткістю. Окрім цього, при його реалізації можуть виникати проблеми, наприклад із постачанням рідкого палива, і загальні затрати на обпалення будуть більшими, аніж при використанні відносно дешевої електричної енергії. Для газифікованих алюмінієвих заводів найкращим з економічної та екологічної точок зору є використання для полуменевого обпалення природного газу.

**Метою статті** є узагальнення результатів досліджень газополуменевого обпалення алюмінієвих електролізерів з анодами, що самовипалюються.

**Методика й результати досліджень.** Температурний режим газополуменевого обпалення досліджували на трьох електролізерах з анодами, що самовипалюються, з верхнім струмовідводом, металевим днищем, за сили струму 130 кА (табл. 1). Обпалювальні установки електролізерів комплектували дванадцятьма або шістнадцятьма газовими пальниками.

**Таблиця 1 – Характеристики й технологічні показники досліджених електролізерів**

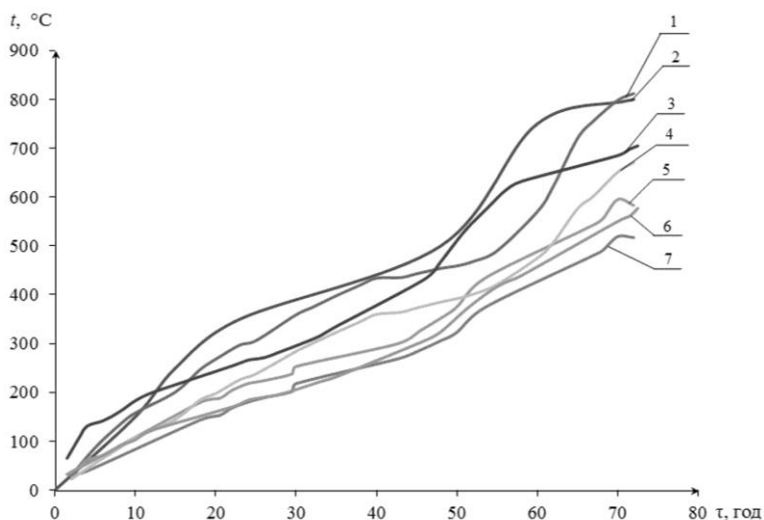
Номер електролізера	Кількість пальників	Кількість встановлених	Тривалість	Витрата природного газу

	в установці	термопар	обпалення $\tau$ , год	$V$ , $m^3$
1	12	9	72	4000
2	12	12	72	5100
3	16	24	72,5	2468

У конструкції катодного пристрою всіх електролізерів були використані аморфні подові блоки (два за шириною і 13 за довжиною), для набивки міжблочних і периферійних швів було застосовано холоднонабивну масу, розміри подини в плані становили  $8,96 \times 3,44$  м.

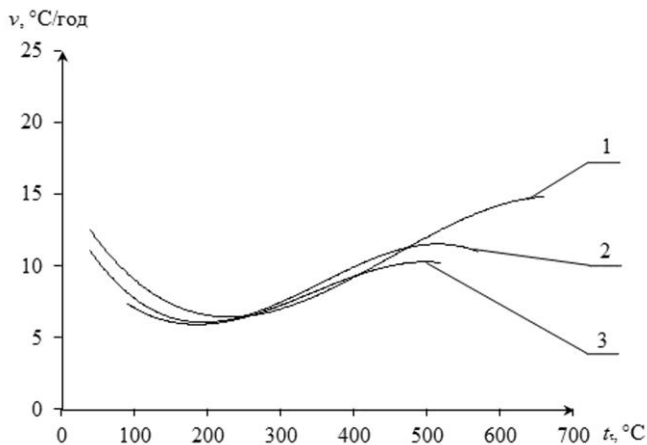
Під час підготовчих робіт для всіх електролізерів розробляли схеми встановлення термопар у катодному пристрої та їхні комунікації. Також попередньо виготовляли хромель-алюмелеві термопари з діаметром термоелектродів 0,5 мм, які ізолювали високотемпературною кремнеземною ниткою, та чохла для термопар (трубки з корозійностійкої сталі внутрішнім діаметром 6 мм, заварених з одного боку). Термопари в чохлах встановлювали в вибраних перерізах й площинах подини (на її поверхні, під подовими секціями, на певних відстанях від поверхні).

Температури вимірювали упродовж усього періоду обпалення з інтервалом 1...2 год. Вторинним приладом був мілівольтметр, під'єднаний до персональної ЕОМ. Вимірювали також витрату природного газу за встановленим лічильником.



1, 2, 3, 5 – поверхня подини: 2 – рекомендована,  
1, 3, 5 – для електролізерів: 1 – № 2, 3 – № 3, 5 – № 1;  
4, 6, 7 – середня за об'ємом: 4 – № 2, 6 – № 3, 7 – № 1

**Рис. 1 – Температури міжблочних швів подини**



**Рис. 2 – Швидкість змінення середньої за об'ємом температури міжблочних швів подини для електролізерів 1 (лінійка 3), 2 (лінійка 1) і 3 (лінійка 2)**

За отриманими показами термопар для кожного з електролізерів визначали усереднені температури поверхні подини, під подовими блоками, та середньооб'ємні для різних проміжків часу від початку обпалення (рис. 1). Зміни відповідних температур міжблочних швів подини для кожного з електролізерів було обумовлено темпом обпалення й витратою палива. Для жодного з обпалених електролізерів зміна температури поверхні міжблочних швів подини не відповідала рекомендованому графіку, хоча частково таку відповідність можна спостерігати для електролізерів 2 і 3.

Далі за методикою, наведеною в праці [3], обчислювали швидкості зміни середньооб'ємних температур міжблочних швів для відповідних температур (рис. 2), а також коефіцієнти нерівномірності температурних полів.

Для всіх досліджених електролізерів швидкість нагрівання подини спочатку зменшується приблизно до середньої за об'ємом температури 200 °C, а потім плавно зростає, причому в інтервалі температур утворення напівкоксу темп нагрівання становить 7...10 °C, тобто відповідає рекомендованому. Далі зростання темпів нагрівання міжблочних швів подини до кінця обпалення спостерігається лише для електролізера 2. Для електролізерів 1 і 3 із температури 450 °C темпи нагрівання сповільнилися.

Рекомендованої температури поверхні міжблочних швів подини, а також рівномірного нагрівання подини

було досягнуто лише для електролізера 2 (табл. 2). Але для цього електролізера було витрачено найбільше природного газу. Для електролізерів 2 і 3 міжблочні шви на кінець обпалення скоксувалися за всією глибиною подини. В електролізері 3 при використанні установки з шістнадцятьма пальниками не було досягнуто необхідної кінцевої температури, але було зменшено витрату природного газу на обпалення

приблизно вдвічі порівняно з електролізером 2. Температурне поле подини після обпалення електролізера 3 характеризувалося суттєвою нерівномірністю.

**Таблиця 2 – Кінцеві показники обпалення електролізерів**

Номер електролізера	Усереднені температури, °С			Коефіцієнт нерівномірності температурного поля $K_{cp}$
	поверхні $\bar{t}_n$	під блоками $\bar{t}_{ол}$	за об'ємом $\bar{t}_\tau$	
1	583	462	517	0,136
2	812	550	671	0,09
3	705	542	577	0,26

Щоб забезпечити необхідну температуру поверхні подини та рівномірність її нагрівання запропоновано заходи з модернізації установки з шістнадцятьма пальниками, зокрема збільшено загальну витрату природного газу в цілому (до 3300 м<sup>3</sup>/год) і на кожний пальник, а також змінено розташування пальників.

Одним з параметрів обпалення є середня температура подини. Вона характеризує стан набивної подової маси міжблочних швів із точки зору їхнього коксування.

Натурні вимірювання температур подини у кожному конкретному випадку здійснити доволі складно, тому для практичного користування необхідно мати відносно прості рівняння, за допомогою яких із достатньою точністю можна розрахувати ці температури в будь-який момент час від початку обпалення.

Із цією метою експериментальні дані було узагальнено в безрозмірній формі відносно середньої за об'ємом температури подини.

Під час обпалення має місце нестационарний тепловий режим нагрівання подини, тобто температура  $t$  залежить від часу  $\tau$ , а безрозмірна температура  $\theta$  – від числа Фур'є  $Fo$  [1]. Із урахуванням кількості теплоти, що виділяється під час спалювання газу і передається конструктивним елементам електролізера  $Q_\tau$ :

$$Fo = 3600\lambda\Delta\tau / (c\rho l_0^2); \bar{\theta}_\tau = 3,6\bar{t}_\tau l_0 \lambda / (V_{год} Q_n^p \eta_{вп}),$$

де  $\lambda = 8$  Вт/(м · К) і  $c\rho = 2,68 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup> · К) – теплопровідність і питома об'ємна теплоємність матеріалу подини (аморфних подових блоків);  $\Delta\tau$  – проміжок часу від початку обпалення, год;  $l_0 = 0,4$  м – визначальний розмір (глибина подини);  $\bar{t}_\tau$  – середня за об'ємом температура подини, °С;  $V_{год}$  – об'ємна

витрата природного газу, м<sup>3</sup>/год;  $Q_n^p = 35900$  кДж/м<sup>3</sup> – нижча теплота згоряння природного газу;  $\eta_{вп}$  – коефіцієнт використання палива, який обчислювали за попередньо побудованою усередненою залежністю цієї величини від середньої за об'ємом температури подини для досліджених електролізерів.

Після узагальнення результатів розрахунків одержано безрозмірне рівняння

$$\bar{\theta}_\tau (12/N)^2 = (1,02 + 10,17Fo - 1,91Fo^2 + 0,27Fo^3) \cdot 10^{-4}, \quad (1)$$

де  $N$  – кількість пальників в установці.

Середню температуру подини розраховують в такий спосіб.

1. Для заданого проміжку часу від початку обпалення  $\Delta\tau$ , год, визначають поточну витрату природного газу  $V_n$ , м<sup>3</sup>, потім – годинну витрату  $V_{год} = V_n/\Delta\tau$ , м<sup>3</sup>/год; штатними заводськими термопарами вимірюють температуру поверхні подини та обчислюють її середнє значення  $\bar{t}_n$ , °С.

2. Обчислюють число Фур'є. З урахуванням відомих величин теплопровідності та питомої об'ємної теплоємності матеріалу катоду і товщини блоків:  $Fo = 6,716 \cdot 10^{-2} \Delta\tau$ .

3. За рівнянням (1) і відомою кількістю пальників  $N$  визначають безрозмірну середню за об'ємом температуру подини  $\bar{\theta}_\tau$ .

4. Визначають коефіцієнт використання палива  $\eta_{вп} = (100 - q_2) / 100$ , де втрати теплоти з димовими газами, %, визначають за наведеною в праці [2] формулою, що для природного газу, відсутності втрат теплоти від неповноти згоряння й коефіцієнта надлишку повітря 1,05, набуде вигляду  $q_2 = 4,31(\theta_{вид} - t_3) / 100$ , де

$\theta_{вид} = \bar{t}_n + 100$  і  $t_3$  – температури димових газів і навколишнього повітря відповідно, °С.

5. Визначають дійсну середню за об'ємом температуру подини для заданого проміжку часу, °С:

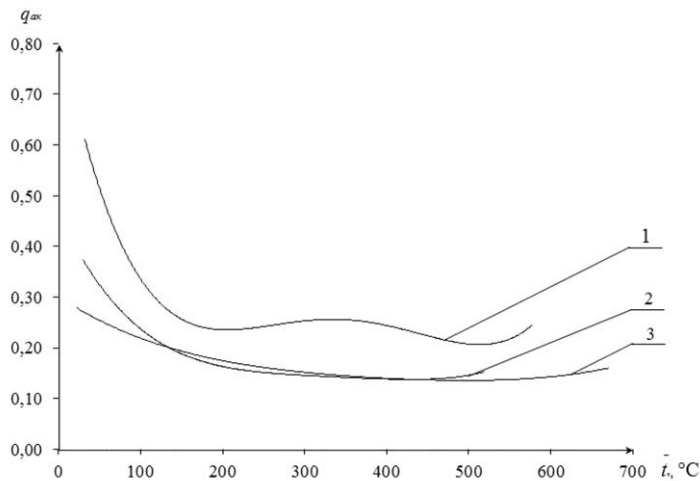
$$\bar{t}_\tau = V_{год} Q_n^p \eta_{вп} \bar{\theta}_\tau / (3,6 l_0 \lambda).$$

Енергетичну ефективність газополуменового обпалення електролізерів з анодами, що самовипаляються, визначали за аналогією з полуменовим обпаленням електролізерів при спалюванні рідкого палива [3]:  $q_{ак} = Q_{ак} / Q_{вид}$ , де  $Q_{ак}$  і  $Q_{вид}$  – кількість акумульованої подиною й виділеної внаслідок спалювання палива теплоти, Дж.

Із фізичної точки зору, решта теплоти  $(1 - q_{ак})$  витрачається на нагрівання інших конструкційних елементів (анода, футеровки, теплоізоляції) і на втрати з димовими газами та в навколишнє середовище крізь зовнішні поверхні електролізера.

При цьому акумульована подиною теплота  $Q_{ак} = V_{к} c_p \bar{t}_t$ , де  $V_{к} = 12,33 \text{ м}^3$  – об'єм подини (вугільних блоків) для досліджених електролізерів. Кількість теплоти від спалювання палива  $Q_{вид} = 1000V_{год} Q_{н}^p \Delta t$ .

Для всіх досліджених електролізерів частка акумульованої теплоти спочатку зменшується з підвищенням температури, а після досягнення температури подини  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  майже не змінюється (0,15 для електролізерів 1 і 2; 0,25 для електролізера 3; рис. 3). Енергетична ефективність є найвищою для електролізера 3, що характеризується найменшою витратою природного газу на обпалення.



**Рис. 3 – Залежність частки акумульованої подиною теплоти від середньої за об'ємом температури для електролізерів 1 (лінія 2), 2 (лінія 3) і 3 (лінія 1)**

алюмофосфатної суміші, рідкого скла чи азбестовою тканиною. Після встановлення обпалювальної установки закривають азбестом зазори між анодом, газозбірним колоколом і панелями укриття, а також бортовою площадкою, після чого монтують газові й повітряні комунікації.

Рекомендований графік зміни температури поверхні подини наведено на рис. 1 (крива 2). За попередніми розрахунками, процес обпалення тривалістю 72 год має бути розбитим на періоди зі змінними темпами нагрівання, зокрема для холоднонабивних подових мас, наприклад, на періоди: до утворення напівкоксу (до  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ), коксування ( $250 \dots 375 \text{ }^\circ\text{C}$ ), нагрівання після утворення напівкоксу (після  $375 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Витрату природного газу в кожному періоді і загалом на процес обпалення визначають за наведеною вище методикою.

Температуру контролюють за показами термопар, а регулювання теплопідведення й забезпечення рівномірності нагріву подини – вмиканням і вимиканням відповідних пальників.

#### Висновки

1. Отримані експериментальні залежності температур подини при газополуменевому обпаленні електролізерів з анодами, що самовипалюються, від терміну обпалення для обпалювальних установок з дванадцятьма і шістнадцятьма пальниками.

2. Запропоноване узагальнене рівняння для визначення середньої температури подини при газополуменевому обпаленні електролізерів для будь-якого проміжка часу при відомій витраті природного газу та температурі поверхні подини.

3. Встановлено, що при газополуменевому обпаленні електролізерів при досягненні середньої температури подини біля  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  тільки 15...25 % виділеної теплоти витрачається на нагрів подини, а решта 75...85 % – на нагрів інших конструкційних елементів електролізерів, втрачається в навколишнє середовище з димовими газами та з поверхонь конструкційних елементів.

4. Розроблена технологічна інструкція газополуменевого обпалення, згідно з якою при дотриманні рекомендованого регламента в кінці процесу обпалення досягаються необхідні температури поверхні подини та забезпечується рівномірне температурне поле у будь-якій площині подини і повне коксування міжблочних швів по всій її глибині.

#### 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. Обжиг и пуск алюминиевых электролизеров / Б. С. Громов, Е. Н. Панов, М. Ф. Боженко и др. ; под общ. ред. Б. С. Громова. – М. : Руда и металлы, 2001. – 336 с.
3. Температурні поля подини та оцінка енергетичної ефективності при полуменевому обпаленні електролізерів великої потужності / С. В. Даниленко, Є. М. Панов, М. Ф. Боженко та ін. // Вісн. НТУУ «КПІ»; сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2010. – № 2 (6). – С. 27–33.

4. Порівняльні характеристики обпалення алюмінієвих електролізерів / С. В. Даниленко, Є. М. Панов, М. Ф. Боженко та ін. // Вісн. НТУУ «КПІ» ; сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 1 (7). – С. 34–40.  
Надійшла до редакції 26.10.2015