

3. Коновалов А. Б. Имитационное моделирование рабочего процесса в прессах с продольной фильтрацией / А. Б. Коновалов // Технично-технологические проблемы сервиса. – 2012. – № 2. – С. 40-47.
4. Ageev M. A. Изучение пористой структуры бумажного полотна при прессовании / М. А. Агеев, А. С. Шаклеин // Химия растительного сырья. – 2014. – № 3. – С. 265-269.

Надійшла до редакції 23.08.2015

Marchevsky V. M., Aksonov I. O.

### PRESSING OF FLUTING

*The physical and mathematical model describing the process of pressing paper for corrugating. Powered decision mathematical description as graphic dependences dry paper web from the time of pressing and operating parameters of the process. The purpose of this article is to determine the patterns of kinetic process pressing fluting on shoe press needed to develop methods of calculating shoe press. Solving mathematical description pressing process found that the maximum speed of dewatering the paper is in the first period, the second period, the speed decreases in the third period and the minimum rate fixed in size. Increased pressure delighted leads to increased speed in the first period, the second and third periods of dehydration speed increases slightly, which is due to compression of the final canvas fluting and a corresponding increase in hydraulic resistance. Further experimental studies are planned kinetics pressing fluting on the shoe press.*

**Keywords:** fluting, pressing, shoe press.

### References

1. Novikov, N.E. (1972). Pressovanye bumazhnogo polotna [Pressing of paper web], Lesnaja promyshlennost Moscow, USSR.
2. Konovalov, A.B. (2011) "Mathematical model of the two-componential filtration with reference to mechanical dehydration of deposits", *Technico-Technologicheskyye problemy servisa*, vol. 3, pp. 81-87.
3. Konovalov, A.B. (2012), "To the question of simulation modeling of the working process in presses with longitudinal filtering", *Technico-Technologicheskyye problemy servisa*, vol. 2, pp. 40-47.
4. Ageev, M. A. and Shaklein, A. S. (2014), "Study of the porous structure of the paper web during pressing process", *Chimia rastitelnoho syria*, vol. 3, pp. 265-269.

УДК 669.713

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., магістр  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ТЕМПЕРАТУРНО-ТЕПЛОВІ ПОКАЗНИКИ ГАЗОПОЛУМЕНЕВОГО ОБПАЛЕННЯ АЛЮМІНІЄВИХ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРІВ

*Наведені результати узагальнення досліджень газополуменевого обпалення електродів 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 електродів.*

**Ключові слова:** алюмінієвий електрод, подина, газополуменево обпалення, енергетична ефективність.

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

**Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень.** Одним з етапів підготовки алюмінієвих електродів 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). Наби-

вання 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 кризь шар металу (обпалення на металі), коксовий дріб'язок чи алюмінієву стрічку (обпалення на опорі) або продукти згорання 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.

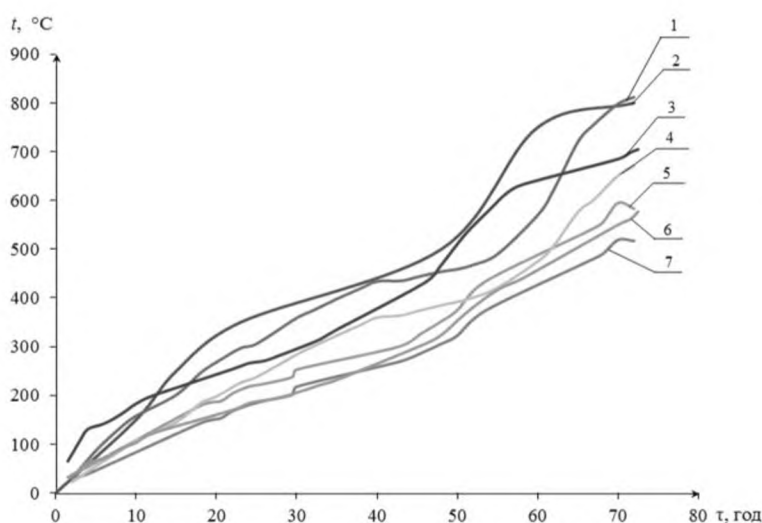
Таблиця 1 – Характеристики й технологічні показники досліджених електролізерів

Номер електролізера	Кількість пальників в установці	Кількість встановлених термопар	Тривалість обпалення $\tau$ , год	Витрата природного газу $V$ , м <sup>3</sup>
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 холоднабивну масу, розміри подини в плані становили 8,96×3,44 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

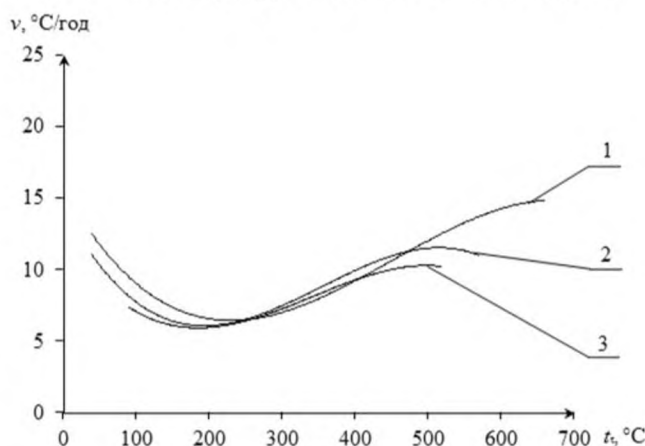


Рис. 2 – Швидкість змінення середньої за об'ємом температури міжблочних швів подини для електролізерів 1 (лінія 3), 2 (лінія 1) і 3 (лінія 2)

тролізеру 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 шістьма 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, °C			Коефіцієнт нерівномірності температурного поля $K_{cp}$
	поверхні $\bar{t}_n$	під блоками $\bar{t}_{bl}$	за об'ємом $\bar{t}_t$	
1	583	462	517	0,136
2	812	550	671	0,09
3	705	542	577	0,26

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 2 (табл. 2). Але для цього електролізера 2 (табл. 2).

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  $Q_\tau$ :

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

де  $\lambda = 8$  Вт/(м · К) і  $c_p = 2,68 \cdot 10^6$  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;  $V_{\text{год}}$  – об'ємна витрата природного газу, м<sup>3</sup>/год;  $Q_n^p = 35900$  кДж/м<sup>3</sup> – нижча теплота згоряння природного газу;  $\eta_{\text{вп}}$  – 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 проміжка часу від початку обпалення  $\Delta\tau$ , год, визначають поточну витрату природного газу  $V_{\text{п}}$ , м<sup>3</sup>, потім – годинну витрату  $V_{\text{год}} = V_{\text{п}}/\Delta\tau$ , м<sup>3</sup>/год; штатними заводськими термометрами вимірюють температуру поверхні подини та обчислюють її середнє значення  $\bar{t}_{\text{п}}$ , °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  $\eta_{\text{вп}} = (100 - q_2) / 100$ , 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  $q_2 = 4,31(\theta_{\text{вд}} - t_3) / 100$ , де  $\theta_{\text{вд}} = \bar{t}_{\text{п}} + 100$  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:

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

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

Із фізичної точки зору, решта теплоти  $(1 - q_{\text{ак}})$  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  $Q_{\text{ак}} = V_{\text{к}} c_p \bar{t}_\tau$ , де  $V_{\text{к}} = 12,33$  м<sup>3</sup> – об'єм подини (вугільних блоків) для досліджених електролізерів. Кількість теплоти від спалювання палива  $Q_{\text{вд}} = 1000 V_{\text{год}} Q_n^p \Delta\tau$ .

Для всіх досліджених електролізерів частка акумульованої теплоти спочатку зменшується з підвищенням температури, а після досягнення температури подини 250 °С майже не змінюється (0,15 для електролі-

зерів 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.

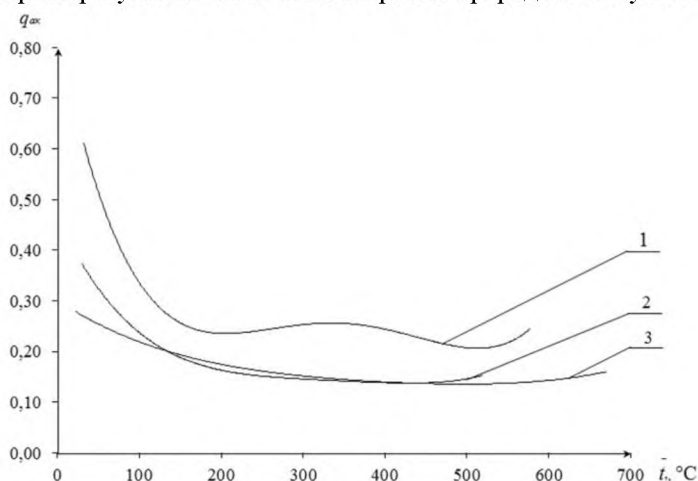


Рис. 3 – Залежність частки акумульованої подиною теплоти від середньої за об'ємом температури для електролізерів 1 (лінія 2), 2 (лінія 3) і 3 (лінія 1)

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 холодонабивних подових мас, наприклад, на періоди: до утворення напівкоксу (до  $250\text{ }^\circ C$ ), коксування ( $250\text{...}375\text{ }^\circ C$ ), нагрівання після утворення напівкоксу (після  $375\text{ }^\circ C$ ). 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  $400\text{ }^\circ C$  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 полуменовому 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

*Panov E. M., Bozhenko M. F., Danilenko S. V., Navozenko A. P.*

#### TEMPERATURE-THERMAL INDICATORS FOR FLAME BURNING ALUMINUM ELECTROLYZERS

*The summarizing results of studies about gas flame burning of electrolyzers with self-burning anodes in the amperage of 130 kA, about volume-average temperatures of the hearth and rates of change of temperature. Dimensionless equation for determining the average temperature of the hearth, for any period of time from the beginning of burning at a certain flow rate of natural gas and the surface temperature of hearth is proposed. Indicators of energy efficiency was identified and technological instruction of gas flame burning of electrolyzers was designed.*

**Keywords:** aluminum electrolyzers, hearth, flame burning, flow rate, energy 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, Moskow, Russia.
2. Gromov, B.S., Panov E.N., Bozhenko M.F. et al. (2001), *Obzhig i pusk aljuminievyh jelektrolizerov* [Firing and commissioning of aluminum electrolyzers], Ruda i metally, Moskow, Russia.
3. Danylenko, S.V., Panov, Ye.M., Bozhenko, M.F. et al. (2010), "Hearth temperature field and evaluation of energy efficiency in large capacity flame burning electrolyzers", *Khimichna inzheneriya, ekolohiya ta resursozberezhennya*, no 2 (6), p. 27–33.
4. Danylenko, S.V., Panov, Ye.M., Bozhenko, M.F. et al. (2011), "Comparative characteristics of heating in aluminum electrolyzers", *Khimichna inzheneriya, ekolohiya ta resurso-zberezhennya*, no 1 (7), p. 34–40.

УДК 678.057

СІВЕЦЬКИЙ В. І., к.т.н., проф.; СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л., к.т.н., доц.; КУШНІР М. С., ІВЦЬКИЙ І. І.  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

#### МОДЕЛЮВАННЯ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВІВ ТЕРМОПЛАСТІВ У БАР'ЄРНОМУ ЗМІШУВАЧІ З УРАХУВАННЯМ ЕФЕКТУ ПРИСТІННОГО ПРОКОВЗУВАННЯ

*Проведено чисельне моделювання процесу температурної гомогенізації розплаву полімеру в динамічному змішувачі бар'єрного типу. Наведено результати моделювання, що дозволяють досліджувати динаміку зміни температур при течії полімерних матеріалів у змішувальних елементах, здійснювати вибір оптимальних конструктивних параметрів змішувальних елементів або обирати технологічні режими гомогенізації полімерних композицій.*

**Ключові слова:** динамічний змішувач, моделювання, гомогенізація, полімер.

© Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Кушнір М. С., Івцький І. І., 2016.

**Постановка проблеми.** Процеси змішування та гомогенізації в черв'ячних машинах мають важливе значення при переробці полімерних матеріалів, тому що якість змішування безпосередньо визначає якість виробу [1]. Для науково обґрунтованого конструктивного оформлення екструзійно-змішувального устаткування важливо знати основні закономірності процесів змішування та гомогенізації, які відбуваються в його різних конструктивних зонах.

Внаслідок різкого збільшення швидкості екструзії виникає ризик виносу непроплавлених частинок полімеру в зону формування, що може призвести до дефектів у виробках. Тому необхідно інтенсифікувати зсу-