УДК 536.24:541.182

В.І. Іванов [(1)], ст. наук. співробітник
Т.М. Нестеренко [(1)], доцент, к.т.н.
В.О. Скачков [(1)], доцент, к.т.н.
Ю.М. Радченко [(2)], доцент, к.т.н.
В.М. Очинський [(1)], ст. викладач
Г.В. Карпенко [(1)], асистент

ДЕЯКІ ПИТАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ ПІД ЧАС УЩІЛЬНЕННЯ ВОГНЕТРИВКИХ ПОРОШКОВИХ СИСТЕМ ТИСКОМ

(Повідомлення II)

[(1)] *Запорізька державна інженерна академія,*
[(2)] *Національна металургійна академія України, м. Дніпропетровськ*

Выполнен сопоставительный анализ ранее полученного решения уравнения энергопроводности, описывающего процесс уплотнения огнеупорных порошковых систем давлением, с известными «уравнениями прессования». Представлена методика построения энергетической и массоконцентрационной диаграмм указанного процесса с последующим их объединением в единую номограммную систему энерго- и массопереноса при уплотнении огнеупорных порошковых систем давлением.

Виконано порівняльний аналіз раніше одержаного вирішення рівняння енергопровідності, що описує процес ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском, з відомими «рівняннями пресування». Подано методику побудови енергетичної та масоконцентраційної діаграм зазначеного процесу з подальшим їх об'єднанням до єдиної номограмної системи перенесення енергії й маси під час ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском.

Вступ. У роботах [1,2] з позицій феноменологічної теорії перенесення енергії та маси дисперсних матеріалів під час обробки тиском [3] розглянуто основні варіанти початкових і граничних умов процесу ущільнення вогнетривких порошкових систем.

Постановка завдання. Дане повідомлення є продовженням циклу робіт, присвячених питанню розробки та подання номограмної інтерпретації процесу ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском.

Основна частина досліджень. Як було зазначено у роботі [1], вирішення рівняння енергопровідності для одномірної задачи:

$$\frac{\partial P_z}{\partial \tau} = a_p \frac{\partial^2 P_z}{\partial z^2} \ , \qquad (1)$$

де P_z – тиск щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату; z – координата за товщиною напівфабрикату; τ – тривалість процесу пресування; a_p – коефіцієнт потенціалопровідності вогнетривкої порошкової системи у прес-формі, що комплексно відображає енергофізичні властивості порошків – за граничних умов першого роду, коли тиск на поверхні «пластини» миттєво підвищують до $P_{пов} = P_{max}$ з подальшим витримуванням ($P_{пов}$ = const) протягом часу τ, а на початку процесу ($\tau = 0$) розподіл тиску

щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату має рівномірний характер, тобто $P(z,0) = P_0$, для «регулярного» періоду ($Fo_p > 0{,}3$) процесу, що розглядають, має вигляд:

© Іванов В.І., Нестеренко Т.М., Скачков В.О., Радченко Ю.М., Очинський В.М., Карпенко Г.В., 2012

$$\theta_p = A_\ell \cdot U_\ell \cdot \exp\left(-m_\ell \cdot Fo\right) , \qquad (2)$$

де θ_p – відносний тиск у точках із координатами $z = 0...\delta$ щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату, $\theta_p = \left(P_z - P_{пов}\right)/\left(P_0 - P_{пов}\right)$; P_z – тиск у точках із координатами $z = 0...\delta$ щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату; $A_\ell = 2\left(-1\right)^{\ell+1} / K_\ell = \text{const}$; K_ℓ – порядковий номер члену ряду: $K_\ell = 0{,}5\left(2\ell - 1\right)\cdot\pi$, $U_\ell = cos\left(K_\ell \cdot z/\delta\right)$; $m_\ell = K_\ell^2 \cdot a_p/\delta^2$; Fo – критерій гомохронності Фур'є за бародифузійним перенесенням енергії, $Fo = a_p \cdot \tau/\delta^2$.

Після логарифмування рівняння (2) можна записати

$$\ln\theta_p = \ln\left(A_\ell \cdot U_\ell\right) - m_\ell \cdot \tau \qquad (3)$$

або

$$\ln\left(\frac{\theta_p}{A_\ell \cdot U_\ell}\right) = -m_\ell \cdot \tau . \qquad (4)$$

У зв'язку з новиною поданих вище співвідношень в області теорії ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском має інтерес порівняння окремих варіантів вирішень рівняння (4) з раніше відомими.

М.Ю. Бальшиним [4] на основі дискретної моделі процесу ущільнення металевих порошків тиском та аналізу контактної взаємодії їх частинок одержано рівняння пресування у вигляді:

$$\ln P_{\max} - \ln P = L \cdot \left(\beta - 1\right) , \qquad (5)$$

де $P_{\max}$ – тиск, який відповідає максимальному ущільненню порошку, тобто максимальній щільності напівфабрикату під час адитивного складання щільності його твердих компонентів; P – тиск пресування ($P = P_{пов}$); β – відносний об'єм напівфабрикату, $\beta = V_c(\tau)/V_0$; $V_c(\tau)$ – поточне значення об'єму напівфабрикату; V_0 – мінімальний об'єм напівфабрикату, коли $P = P_{\max}$; L – «чинник пресування».

Виконуючи перетворення рівняння (5), одержують співвідношення.

$$\ln\left(\frac{P}{P_{max}}\right) = \ln\theta_p = -m_\ell \cdot \tau , \qquad (6)$$

де m_ℓ – «темп пресування», $m_\ell = 2{,}3\ LW\cdot(\tau)/h_{\min}$; $W(\tau)/h_{\min}$ – швидкість руху пуансона, яка подана у масштабі мінімальної товщини напівфабрикату $h_{\min}$.

Зіставлення рівнянь (4) і (6) дозволяє відзначити, що, по-перше, маючи однакову структуру, вони описують один і той же механізм процесу перенесення енергії у порошкових середовищах, по-друге, рівняння (6) можна розглядати як окремий випадок узагальненої феноменологічної теорії ущільнення дисперсних матеріалів тиском [3], який відповідає стадії «регулярного» режиму для середніх значень тиску щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату. Аналіз відомих моделей – «рівнянь пресування», поданих у роботах [5,6], також призводить до аналогічного висновку.

Для виконання експериментів щодо вивчення закономірностей процесу ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском розроблено контрольно-вимірю-вальну систему, яка здійснює контроль тиску пресування та лінійних переміщень рухомого пуансона (або матриці) протягом циклу ущільнення за допомогою механоелектричних перетворювачів типу ДМП-250 та датчиків переміщення індуктивного типу, а також синхронний запис змінювання вказаних параметрів з використанням реєструючого приладу типу А-650-001.

Вивчення процесу ущільнення вогнетривких порошкових систем здійснювали на гідравлічних пресах одностороннього надання тиску до енерго-масоприймаючої поверхні ущільнюваного напівфабрикату. Криві змінювання питомого тиску ($P_{пит}$) за часом (τ) для зазначених систем різного складу (табл. 1), подано на рис. 1. На цьому ж рисунку виділено основні періоди процесу ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском: «інерційний» ($\tau_{ін}$) і «регулярний» ($\tau_{р}$), а також надано методику визначення часу запізнювання ($\tau_{зап}$), протягом якого тиск у точках із координатами z_i досягає його значень на поверхні ущільнюваного напівфабрикату.

Таблиця 1 – *Склад вогнетривких порошкових систем, що досліджують*

Індекс системи	Периклаз, % фракція, мм		Хроміт, % фракція, мм		Дуніт, % фракція, мм
	3…0.5	0,06	3….0,5	0,06	3….0,5
1	66,0	34,0	-	-	-
2	66,0	-	-	34,0	-
3	66,0	17,0	-	17,0	-
4	46,0	20,4	20,0	13,6	-
5	-	34,0	66,0	-	-
6	-	34,0	46,0	-	20,0

Вивчення процесу ущільнення вогнетривких порошкових систем здійснювали на гідравлічних пресах одностороннього надання тиску до енерго-масоприймаючої поверхні ущільнюваного напівфабрикату. Криві змінювання питомого тиску ($P_{пит}$) за часом (τ) для зазначених систем різного складу (табл. 1), подано на рис. 1. На цьому ж рисунку виділено основні періоди процесу ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском: «інерційний» ($\tau_{ін}$) і «регулярний» ($\tau_{р}$), а також надано методику визначення часу запізнювання ($\tau_{зап}$), протягом якого тиск у точках із координатами z_i досягає його значень на поверхні ущільнюваного напівфабрикату.

Відповідно до основного принципу механіки «дія дорівнює протидії» манометричний тиск пресування ($P_{ман}$), віднесений до одиниці площі рухомого пуансона, тотожно дорівнює тиску, що діє на енерго-масоприймаючу поверхню ущільнюваного напівфабрикату ($P_{пов}$). Завдяки дисипації енергії, тобто її розсіяній витраті на перенесення маси, спостерігається зниження тиску від поверхні ущільнюваного напівфабрикату до його центральної частини.

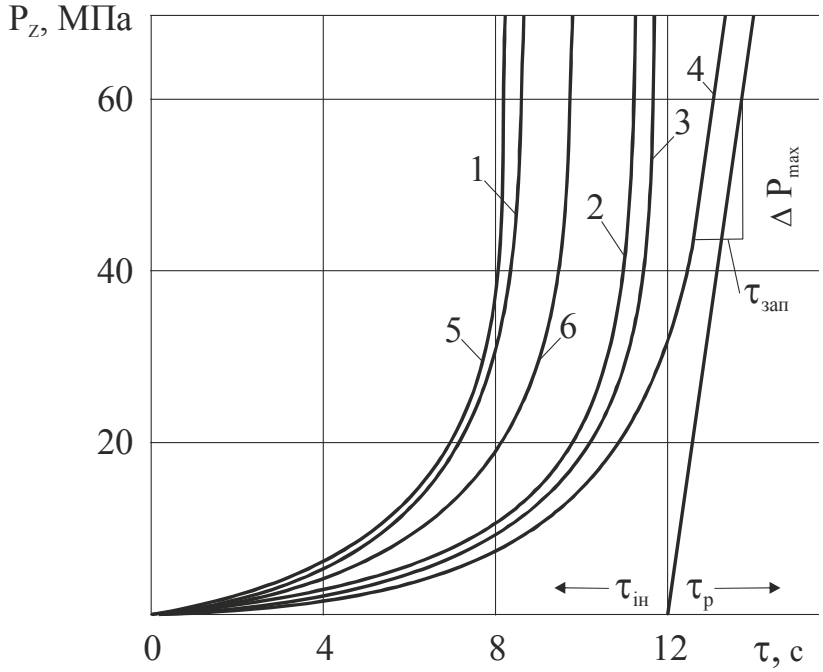
Пряма 1, що відповідає залежності $P_{пов} = f_1(\tau)$ для «регулярного» періоду процесу ущільнення вогнетривких порошкових систем (рис. 1), є дотичною до кривої $P_{пов,ін.} = f_2(\tau)$, яка відповідає його «інерційному» періоду. Момент часу, який відповідає положенню точки дотику, є межею закінчення «інерційного» періоду та початком залучення до процесу перенесення елементарних шарів зазначених систем, що знаходяться поблизу поверхні нерухомого пуансона. Передбачається,

що після початку «регулярного» періоду даного процесу час запізнювання ($\tau_{зап}$) залишається постійною величиною. Відповідно до цього здійснюють побудову прямої очікуваного змінювання тиску поблизу нерухомого пуансона для «регулярного» періоду зазначеного процесу та визначають величину максимального перепаду тиску за перерізом системи $\Delta P_{\max}$ ($\Delta P_{\max} = P_{пов} - P_{віс}$) щодо діапазону часу $\tau_{зап}$.

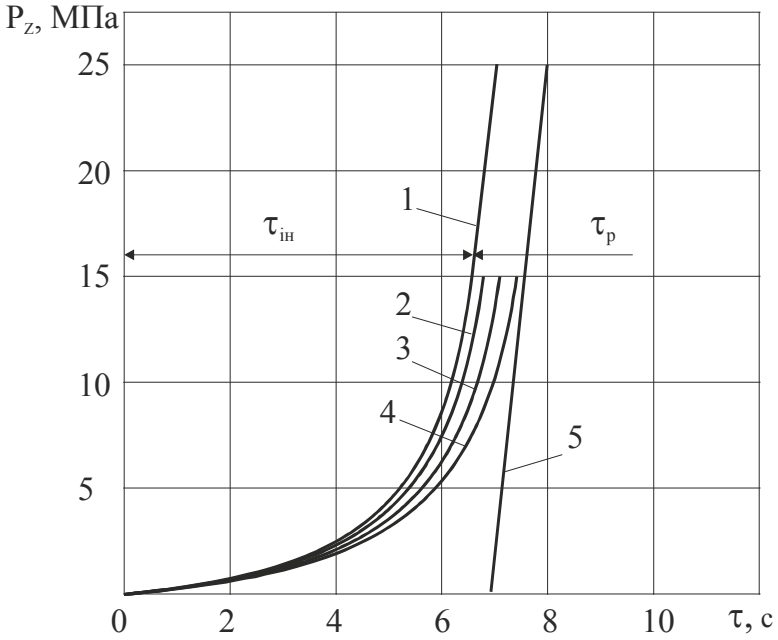
З використанням даних рис. 1 та співвідношення, поданого у роботі [1]:

$$\tau_{ін} \cong \frac{0,2\,\delta^2}{a_p}\ , \qquad (7)$$

де $\tau_{ін}$ – тривалість «інерційного» періоду процесу ущільнення; δ – розрахункова товщина ущільнюваного напівфабрикату, – можна визначити середні значення коефіцієнта потенціалопровідності $a_{p,ін.}$ зазначеного напівфабрикату з різних порошкових систем для «інерційного» періоду процесу, що досліджують.



1, 2 … 6 - *індекси вогнетривких систем*
$\tau_{ін}$ - *час «інерційного» періоду*; $\tau_р$ - *час «регулярного» періоду*;
$\tau_{зап}$ - *час запізнювання*
а)



1 - *тиск на поверхні*; 2, 3, 4 - *тиск на відстані* 5, 10 і 20 мм *від поверхні*; 5 - *тиск у центрі напівфабрикату*

б)

а) *експериментальні криві пресування систем складів* 1…6

б) *експериментально-аналітичні криві пресування системи складу* «1»

Рисунок 1 – *Енергетичні діаграми пресування периклазо-хромітових і хроміто-периклазових вогнетривких систем*

Аналіз закономірностей розвитку процесу ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском $P = f(\tau)$ для його «регулярного» періоду (τ_p) показує, що перенесення енергії для даного періоду можна моделювати граничними умовами першого роду $P_{пов}/\partial\tau = C_p = \text{const}$.

При цьому різницю тисків на поверхні та у центрі ущільнюваного напівфабрикату визначають за допомогою співвідношення

$$\Delta P = P_{пов} - P_{вік} = \frac{C_p \cdot \delta^2}{2\, a_p} = \text{const} \ , \tag{8}$$

звідки можна записати

$$\frac{P_{пов,0} - P_{вік,0}}{C_p \cdot \tau} = \frac{P_{пов,1} - P_{вік,1}}{C_p \cdot \tau} \ . \tag{9}$$

Якщо

$$P_{пов,1} = P_{пов,0} + C_p \cdot \tau_{зап} \ ; \tag{10}$$

$$P_{вік,1} = P_{пов,0} \ ; \tag{11}$$

$$\tau = \tau_{зап} \ , \tag{12}$$

то мають

$$\frac{\Delta P_1}{C_p \cdot \tau_{зап}} = 1 \ ; \tag{13}$$

$$\frac{\Delta P_0}{C_p \cdot \tau_{зап}} = 1 \ . \qquad (14)$$

Зі співвідношення (7) з урахуванням умови (8) можна визначити час запізнювання:

$$Fo_{зап} = \frac{a_p \cdot \tau_{зап}}{\delta^2} \cong 0{,}5 \ . \qquad (15)$$

Для відомих значень часу запізнювання $\tau_{зап}$ (рис. 1) з використанням рівняння (15) можна розрахувати середню ефективну величину коефіцієнта потенціалопровідності ($a_{p,p}$) для «регулярного» періоду процесу ущільнення напівфабрикату. Розрахункові значення $a_{p,ін}$ та $a_{p,p}$ для напівфабрикату з вогнетривких порошкових систем різного складу подано у табл. 2.

Таблиця 2 – *Характеристика режимів пресування вогнетривких порошкових систем*

Індекс системи	Тривалість періодів пресування, с		Швидкість тиску на поверхні системи, $C_{пов}$ 10^5, Па/с	Коефіцієнт a_p 10^{-4}, м^2/с		Максимум перепаду тиску за перерізом системи, P_{max} 10^5, Па
	$\tau_{ін}$	$\tau_{зап}$		$a_{p,ін}$	$a_{p,p}$	
1	7,0	0,7	282	0,38	14,0	197
2	10,0	1,0	362	0,26	14,5	228
3	10,2	0,7	295	0,26	13,0	230
4	11,6	1,1	272	0,23	8,5	300
5	7,0	0,5	434	0,38	18,7	217
6	7,7	0,7	227	0,35	11,2	160

Обчислення розподілу тиску щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату для «інерційного» періоду процесу пресування можна виконати під час моделювання його форми у вигляді «нескінченного» тіла. При цьому зазначений період процесу ущільнення поділяють на ділянки ($\Delta\tau$), де швидкість підвищення тиску на енерго-масосприймаючій поверхні ущільнюваного напівфабрикату можна прийняти постійною величиною ($\partial P_{пов}/\partial\tau = C_p = \text{const}$).

У цьому разі вирішення рівняння енергопровідності (1) за початкової умови $P(z,0) = 0$ має вигляд:

$$P(z,\tau) = 4\, C_p \cdot \tau \cdot i^2 \cdot \text{erfc}\left(\frac{z}{2\left(a_p \cdot \tau\right)^{0,5}} \right) \ . \qquad (16)$$

На рис. 2 наведено експериментально-аналітичні дані процесу ущільнення вогнетривкої порошкової системи складу «1» $P(z) = f(\tau)$ за $z = 0$ і $P = P_{пов}$. Аналогічним чином можна подати енергетичні характеристики процесу ущільнення порошкових систем складів «2»...«6».

Перехід від поля тиску щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату до поля концентрації маси порошку $\rho = \varphi(z,\tau)$ виконують за допомогою «рівнянь пресування». Шляхом синхронного запису динаміки підвищення тиску (зусилля пресування) та поточних значень об'єму напівфабрикату з використанням реєструючих приладів системи контролю режимів пресування на гідравлічних пресах визначають функціональну залежність між середньою щільністю вогнетривкої порошкової системи, яку ущільнюють (ρ_i), і тиском пресування (P_i).

Обробку результатів експериментів проводять відповідно до аналітичної моделі Верніковського [5], яка порівняно з іншими відомими рівняннями пресування є найбільш прийнятною для опису процесу ущільнення вогнетривких систем тиском:

$$\theta_\rho = \exp\left(-\alpha \cdot P_i^n\right), \qquad (17)$$

де θ_ρ – відносна щільність ущільнюваного напівфабрикату, що відповідає тиску P_i, $\theta_\rho = \left(\rho_{гр} - \rho_i\right) / \left(\rho_{гр} - \rho_0\right)$; $\rho_{гр}$ – гранична щільність ущільнюваного напівфабрикату за твердофазовими компонентами вогнетривкої порошкової системи; ρ_0 – насипна щільність системи; ρ_i – середня щільність системи за відповідним тиском P_i для «тонкого» тіла з мінімальною масивністю (коли $Bi \Rightarrow 0$); α, n – коефіцієнти, які залежать від властивостей вогнетривкої порошкової системи.

Таблиця 3 – *Параметри ущільнення вогнетривких порошкових систем* 1…6

Індекс системи	Насипна щільність $\rho_0 \cdot 10^3$, кг/м^3	Гранична щільність $\rho_{пр} \cdot 10^3$, кг/м^3	Різниця щільності $\Delta\rho \cdot 10^3$, кг/м^3	Параметр α	Параметр n
1	1,500	3,300	1,800	0,213	0,227
2	1,625	3,674	2,050	0,408	0,148
3	1,582	3,487	1,905	0,156	0,282
4	1,660	3,670	2,010	0,203	0,207
5	1,620	4,026	2,406	0,154	0,232
6	1,660	3,796	2,136	0,516	0,112

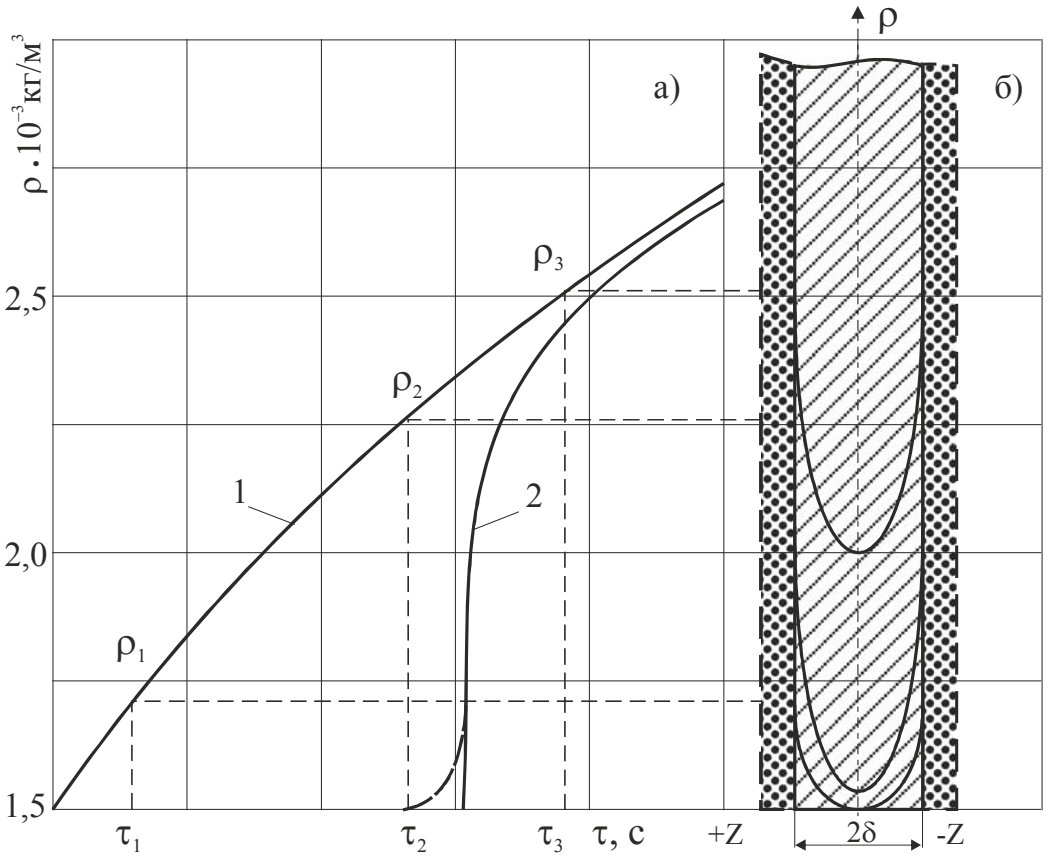
У табл. 3 наведено результати оцінки ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском з використанням безрозмірного параметра θ_ρ. Перехід на розмірні значення щільності може бути здійснено шляхом перерахувань параметра θ_ρ на ρ_i за формулою (17) з використанням даних табл. 3 і графіків, поданих на рис. 1.

Розподіл поля концентрації вогнетривкої порошкової системи щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату (за координатою z) на будь-який момент часу процесу пресування (τ) може бути одержаним на основі вирішення рівняння енергопровідності (1) за відповідних режимів пресування або на основі експериментально-аналі-тичних залежностей $P = f(z,\tau)$, поданих на рис. 2, з використанням даних табл. 4 і рівняння (17).

Таблиця 4 – *Характеристика ущільнення порошкових систем складів* 1…6

Індекс системи	Відносна щільність напівфабрикату θ, одержаного за тиском P (МПа)						
	0	10	20	40	60	80	100
1	1,0	0,638	0,576	0,517	0,478	0,462	0,458
2	1,0	0,592	0,502	0,421	0,375	0,362	0,352
3	1,0	0,634	0,548	0,475	0,421	0,387	0,363
4	1,0	0,649	0,592	0,534	0,492	0,465	0,460
5	1,0	0,750	0,662	0,590	0,555	0,521	0,509
6	1,0	0,575	0,487	0,401	0,362	0,348	0,329

Розрахункові дані змінювання щільності щодо товщини ущільнюваного напівфабрикату за часом (τ) та режимом пресування, що відповідає умовам експерименту (рис. 1, табл. 2), наведено на рис. 3 масоконцентраційною діаграмою ущільнення периклазової порошкової системи складу «1» (табл. 1).



а) *динаміка змінювання щільності на поверхні* (1) *та в центрі* (2) *напівфабрикату протягом пресування*; *б*) *динаміка розподілу щільності за товщиною напівфабрикату*

Рисунок 2 – *Масоконцентраційна діаграма пресування вогнетривкої системи для складу* «1»

Для комплексного та синхронного подання процесів перенесення, що відбуваються у напівфабрикаті, якого ущільнюють тиском, здійснюють об'єднання енергетичної $P = f(z,\tau)$ [рис. 1] та масоконцентраційної $\rho = \varphi(z,\tau)$ [рис. 2] діаграм до єдиної номограмної системи перенесення енергії та маси [7] (рис. 3).

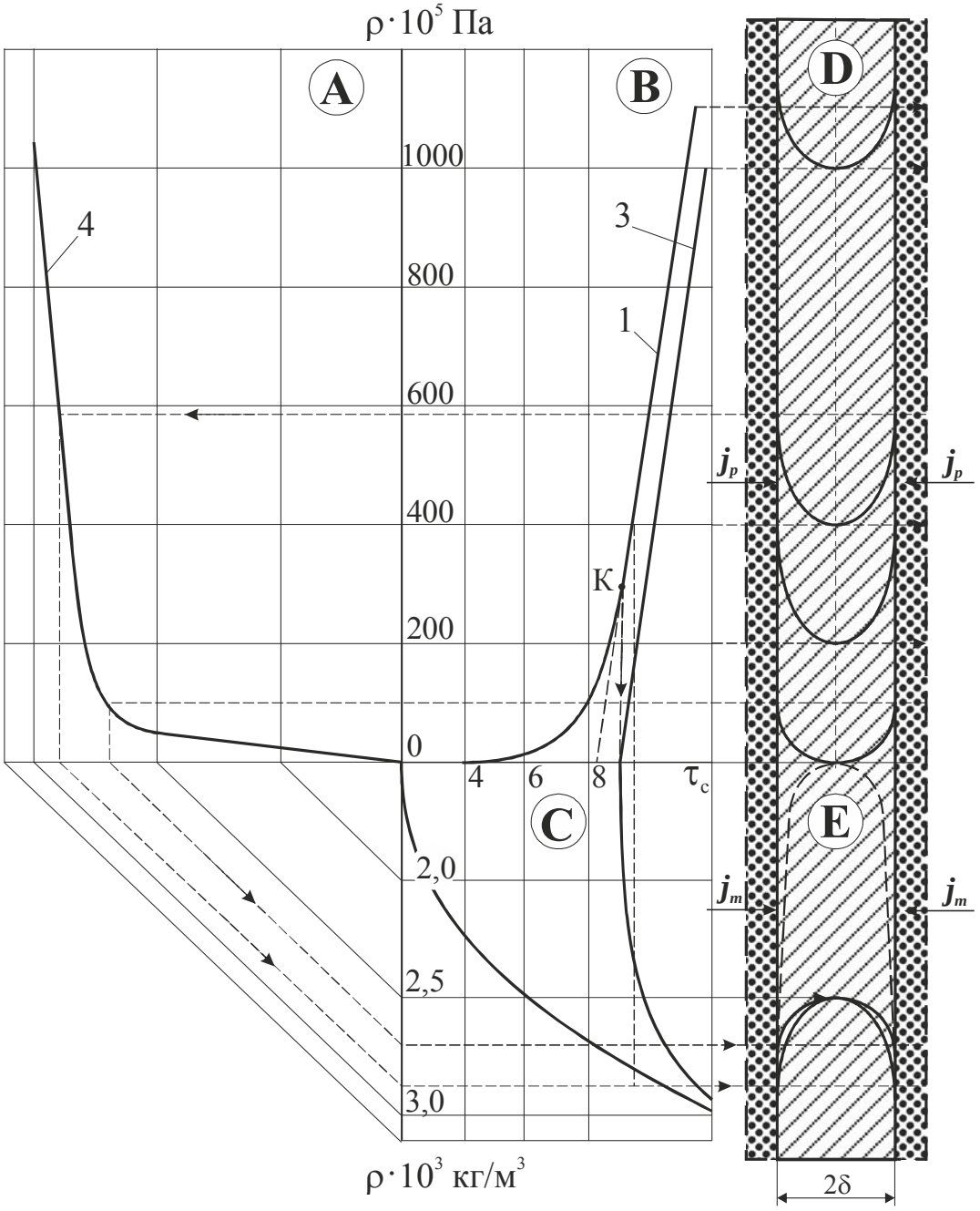


Рисунок 3 – *Енерго-масоконцентраційна номограма динаміки процесу пресування периклазо-хромітової вогнетривкої системи для складу* 1

У квадранті «А» номограми подають експериментально-аналітичну криву ущільнення $\rho = \psi(P)$ відповідно до «рівняння пресування» для «тонкого» тіла вогнетривкої системи, що досліджують. Під час побудови таких діаграм для різних вогнетривких і керамічних систем з достатнім ступенем наближення можуть бути використаними «рівняння пресування», що запропоновано різними авторами [5,6]. Для одержання кривих ущільнення периклазо-хромітових і хроміто-периклазових систем можуть бути використаними дані $\theta_\rho = \psi(P)$ або табл. 4 і рівняння (17).

У квадранті «В» розташовують енергетичну діаграму процесу ущільнення вогнетривкої порошкової системи та досліджують $P_{пов} = f_1(\tau)$, $P_{віс} = f_2(\tau)$ відповідно до методики викладеної вище.

У квадранті «С» (з використанням квадрантів «А» та «В») подають масоконцентраційну діаграму процесу ущільнення напівфабрикату $\rho_{пов} = \varphi_1(\tau)$, $\rho_{віс}$

= $\varphi_2(\tau)$ за методикою побудови діаграми рис. 2. Синхронність подання процесів перенесення енергії та маси в ущільнюваній системі досягають відповідним послідовним перенесенням точок $P_z = f(\tau)$ у $\rho = \psi(P)$ та далі у $\rho = f(z,\tau)$, як це надано на рис. 3.

У квадрантах «Д» і «Е» номограми подають криві очікуваного розподілу тиску та щільності щодо товщини ущільнюваного напівфабрикату в міру розвитку процесу пресування за часом (методику побудови діаграм для квадрантів «А» і «В» показано на номограмній системі штриховими лініями).

Висновки

1. Зіставлення моделі запропонованого підходу до процесу обробки вогнетривкої порошкової системи тиском з раніше відомими моделями свідчить про те, що вони описують один і той же механізм перенесення енергії у порошкових середовищах.

2. Розроблено номограмну систему для подання процесів перенесення енергії та маси вогнетривких порошків під час їх ущільнення тиском.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Деякі питання процесів перенесення під час ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском (повідомлення I) [Текст] / *В. І. Іванов*, Т. М. Нестеренко, В. О. Скачков та ін. // Металургія : наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2011. – Вип. 25. – С. 106-110.
2. Дослідження процесів перенесення під час виробництва вогнетривів [Текст] / *В. І. Іванов*, Т. М. Нестеренко, В. О. Скачков, Ю. В. Мосейко // Материалы VII междунар. науч.-практ. конф. «Прикладные научные разработки-2011». – Днепропетровск : Наука и образование, 2011. – Т. 7. – С. 39-40.
3. *Kharchenko*, *I. G.* Phenomenological theory of energy and mass transfer for pressure shaping of disperse materials [Text] / I. G. Kharchenko // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1975. – V. 18. – P. 953-959.
4. *Бальшин*, *М. Ю.* Научные основы порошковой металлургии и металлических волокон [Текст] / М. Ю. Бальшин. – М. : Металлургия, 1972. – 335 с. – Библиогр. : с. 331-335.
5. Производство огнеупоров полусухим способом [Текст] / *А. К. Карклит*, А. П. Ларин, С. А. Лосев, В. Е. Верниковский / Под ред. А. К. Карклита. – 2-е изд., перераб. – М. : Металлургия, 1981. – 309 с. – Библиогр. : с. 304-308.
6. *Попильский*, *Р. Я.* Прессование порошковых керамических масс [Текст] / Р. Я. Попильский, Ю. Е. Пивинский. – М. : Металлургия, 1983. – 176 с. – Библиогр. : с. 171-176.
7. Исследование термодинамики необратимых процессов в дисперсных системах [Текст] / *И. Г. Харченко*, И. И. Кобеза, В. И. Иванов и др. // Тепломассобмен в дисперсных системах. – Минск : ИТМО НАН РБ, 1996. – Т. V. – С. 208-214.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2011 р.
Рецензент, проф. Г.О. Колобов