

УДК 621.002:661.666

В. О. Скачков¹
 В. І. Іванов¹
 О. Р. Бережна¹

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИТІВ У ПЛАСКОМУ РЕАКТОРІ

¹Запорізька державна інженерна академія

Запропоновано методику розрахунку процесу ущільнення вуглецевих композитів у робочому об'ємі плоского реактора. Методика передбачає визначення розподілу концентрації реакційного газу (пропану) за довжиною реактора зазначеного типу з урахуванням його доставки до нагрітих пористих поверхонь вуглецевих композитів і наступного розкладання з утворенням піролітичного вуглецю на поверхні пір.

Ключові слова: вуглецевий композит, плоский реактор, ущільнення, піролітичний вуглець, пропан, розрахунок.

Вступ

Поширення галузі застосування вуглецевих композитів залежить від зниження рівня їх собівартості, яка значною мірою визначається енергетичними витратами на виробництво. Зниження температури ущільнення пористої структури вуглецевих композитів до 600...700 °С шляхом використання зріджених вуглеводнів, зокрема пропану, дозволяє знайти підхід до вирішення проблеми зберігання енергії під час їх виробництва [1].

Питання ущільнення пористої структури вуглецевих композитів піролітичним вуглецем досліджено у роботах [2—4], проте не розглянуто реальну структуру пір зазначених матеріалів та не виконано оцінювання її впливу на процес ущільнення. У роботі [3] враховано пористу структуру вуглецевих композитів шляхом подання її ефективною пористістю із характерним радіусом усередненої пори.

Метою роботи є розробка методики розрахунку процесу ущільнення вуглецевих композитів у плоскому реакторі в умовах ізотермічного нагрівання з урахуванням дифузії реакційного газу (пропану) до реальної пористої структури та розкладання на поверхні пір з утворенням піролітичного вуглецю.

Розробка методики

Відомо, що реальну пористу структуру вуглецевих композитів можна подати програмою, що має чотири характерні групи щодо розміру ефективного радіуса [5]: перша група — 0,001...0,03 мкм, друга група — 0,03...2,50 мкм, третя група — 2,50...10,0 мкм і четверта група — 10...200 мкм. Доля пір першої групи складає 38 %, другої групи — 32 %, третьої — 19 % і четвертої — 11 %.

Процес дифузії пропану в модельній порі з ефективним радіусом r за умов його розкладання на поверхні пори можна записати диференціальним рівнянням [3]

$$\frac{d^2C}{d\ell^2} = \frac{2k}{rD}C \quad (1)$$

з крайовими умовами

$$C|_{\ell=0} = C_0^{\text{II}} ; \quad \left. \frac{dC}{d\ell} \right|_{\ell=h} = 0, \quad (2)$$

де C — концентрація пропану; ℓ — координата за довжиною пори; k — константа швидкості розкладання пропану на нагрітій поверхні; D — коефіцієнт дифузії у порі; C_0^{II} — концентрація пропану біля входу до пори; h — половина товщини ($2h$) стінки вуглецевого композита.

Розв'язок системи рівнянь (1)–(2) має вигляд

$$C(\ell) = C_0^{\text{II}} \left[\frac{\exp(z \cdot \ell)}{1 + \exp(2z \cdot h)} + \frac{\exp(-z \cdot \ell)}{1 + \exp(-2z \cdot h)} \right], \quad (3)$$

де z — корінь характеристичного рівняння; $z = (2k/r \cdot D)^{0,5}$.

В об'ємі реактора реалізуються два дифузійні потоки пропану, які спрямовано від центру реактора, відповідно, на його безпористу стінку та пористу поверхню вуглецевого композита.

Потік на поверхню стінки реактора можна визначити методом рівнодоступних поверхонь Франк-Каменецького [6]. У такому разі концентрацію пропану на поверхні реактора C_0^P обчислюють за формулою

$$C_0^P = \frac{\beta C}{\beta + k}, \quad (4)$$

де β — константа швидкості дифузії.

На поверхні вуглецевого композита відбувається розкладання пропану та дифузія у пори чотирьох груп з осадженням піролітичного вуглецю на їх поверхні.

З урахуванням викладеного концентрацію пропану на поверхні вуглецевих композитів C_0^{II} можна визначити як

$$C_0^{\text{II}} = \frac{\beta C}{\left[\beta + k(1 - q_n) + q_n \pi \sum_{i=1}^N \Omega_i \right]}, \quad (5)$$

де q_n — пористість поверхні вуглецевого композита;

$\Omega_i = r_i^2 D_i z_i p_i \left[\frac{\exp(-2z_i h) - \exp(2z_i h)}{2 + \exp(2z_i h) + \exp(-2z_i h)} \right]$; r_i, p_i — відповідно, середній ефективний радіус і від-

носна доля i -ї характерної групи пористої структури вуглецевого композита; N — кількість характерних груп пор.

Розглядають плаский реактор шириною b_p і довжиною L , між бічними стінками якого розташовують пласку пластину вуглецевого композиту шириною b_n і товщиною $2h$. Пропан рівномірно обтікає зазначену пластину з обох боків і дифундує на поверхню стінок реактора та пластини, які нагріті до постійної температури T . За такої температури пропан розкладається на нагрітих поверхнях з осадженням піролітичного вуглецю відповідно до рівняння



Константу швидкості розкладання у рівнянні (6) задають у вигляді співвідношення Арреніуса $k = k_0 \exp(-E/R \cdot T)$, де E — енергія активації процесу (6); k_0 — передекспонента; R — газова постійна.

Диференціальне рівняння перенесення пропану за довжиною плаского реактора з урахуванням його розкладання має вигляд

$$\frac{d(CU)}{dx} = -k\beta C \left[\frac{b_p}{\beta + k} + \frac{b_n}{\beta + k(1 - q_n) + q_n \pi \sum_{i=1}^N \Omega_i} \right], \quad (7)$$

де U — швидкість течії пропану за довжиною реактора; x — координата, спрямована за довжиною реактора від входу пропану до реактора.

З рівняння (6) випливає, що

$$C_{C_3H_8} = C_{ent}^{C_3H_8} (1 - \alpha); \quad C_{H_2} = C_{ent}^{C_3H_8} 4\alpha; \quad U = U_{ent} (1 + 3\alpha), \quad (8)$$

де $C_{ent}^{C_3H_8}$ — концентрація пропану на вході до реактора; U — швидкість подавання пропану до реактора; α — питома міра розкладання пропану за довжиною реактора.

З урахуванням співвідношень (8) рівняння (7) можна записати як

$$\frac{2(1-3\alpha)}{1-\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dx} + \gamma = 0, \quad (9)$$

$$\text{де } \gamma = \frac{k\beta}{U_{ent}} \left[\frac{b_p}{\beta + k} + \frac{b_n}{\beta + k(1 - q_n) + q_n \pi \sum_{i=1}^N \Omega_i} \right].$$

Рівняння (9) задає міру розкладання пропану за довжиною реактора, що враховує процеси осадження піролітичного вуглецю на стінках реактора та у пористій структурі пластини вуглецевого композита.

Розділяючи змінні параметри у рівнянні (9) й інтегруючи його ліву частину від 0 до α , а праву частину — від 0 до x , а також враховуючи мализну питомої міри розкладання пропану α , отримаємо:

$$\alpha(x) = 0,25 \left[(1 + 8\gamma x)^{0,5} - 1 \right]. \quad (10)$$

У рівняннях (4) і (5) константа швидкості дифузії β є невідомою. Для її знаходження дослідним шляхом визначають швидкість виходу пропану U_{dis} та обчислюють межу міру його розкладання на виході з реактора

$$\alpha(L) = \frac{1}{3} \left(\frac{U_{dis}}{U_{ent}} - 1 \right). \quad (11)$$

Підставляючи співвідношення (11) у рівняння (10) для $x = L$ і враховуючи змінні параметри, що входять до рівняння (9), маємо:

$$\beta = Q + (Q^2 - G)^{0,5}, \quad (12)$$

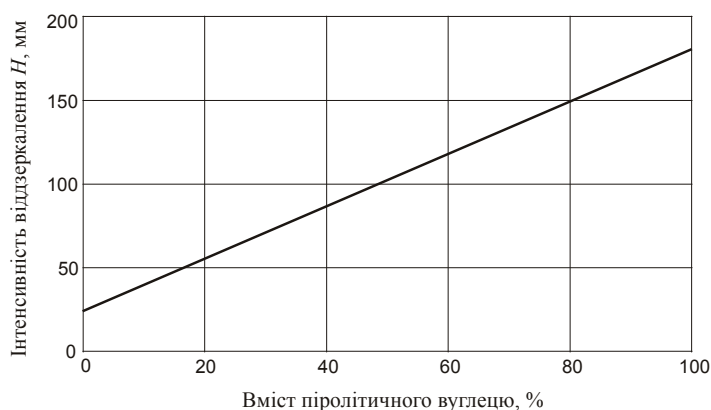
$$\text{де } Q = F(b_p - V) + k(b_n - V); \quad F = k(1 - q_n) + q_n \pi \sum_{i=1}^N \Omega_i; \quad G = \frac{VkF}{V - b_p - b_n}; \quad V = \frac{U_{ent} \left[(4\alpha + 1)^2 - 1 \right]}{8kL}.$$

Константу швидкості гетерогенного розкладання пропану на нагрітих поверхнях визначено у роботі [1]. Формула (12) дозволяє обчислювати константу швидкості дифузії пропану від ядра реактора до поверхні розкладання.

Експериментальна перевірка

Як приклад розглянуто процес ущільнення карбонізованого вуглепластика на основі вуглецевих волокон ВМН-4 і феноло-формальдегідного зв'язувального матеріалу СФ-010. Розрахункові значення вмісту піролітичного вуглецю подано у табл.

Експериментальні значення розподілу піролітичного вуглецю визначали за інтенсивністю віддзеркалення (H) електронів від зразків у вигляді пігулок, що відпресовували з порошків, отриманих із певного шару карбонізованого вуглепластика після ущільнення його піролітичним вуглецем. Рентгенограми отримали на дифрактометрі «ДРОН-2у» в CuK_α -випромінюванні з довжиною хвилі, що складала $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$. Вміст піролітичного вуглецю у трикомпонентному зразку, що вміщує волокна ВМН-4, піролітичний вуглець і коксовий залишок феноло-формальдегідної смоли СФ-010, визначали з використанням тарувального графіка, (рис.), який побудовано за експериментальними даними, отриманими на зразках із заданим співвідношенням компонентів. Вміст піролітичного вуглецю у трикомпонентних зразках змінювали від нуля до 100 %.



Залежність максимальної інтенсивності віддзеркалення електронів від вмісту піролітичного вуглецю

Змінювання структурних параметрів вуглецевих композитів, ущільнених піролітичним вуглецем

Номер зразка	Товщина зразка, мм	Номер шару	Структурні параметри, Å		Інтенсивність віддзеркалення, H , мм	Вміст піровуглецю, %	
			D_{002}	L_c		дослід	розрахунок
1	16	1	3,4619	26,9	182	100	98
		2	3,4663	26,2	78	32	30
		3	3,4756	24,5	76	31	29
		4	3,4786	27,4	75	30	27
		5	3,4792	27,6	68	28	25
		6	3,4885	28,4	65	25	22
		7	3,4707	28,9	60	21	21
		14	3,4707	26,8	80	36	34
2	15	1	3,4443	28,9	160	90	89
		2	3,4591	26,9	93	42	44
		3	3,4532	28,9	60	21	23
		4	3,4445	29,5	55	19	20
		5	3,4487	26,9	55	19	18
3	15	1	3,4885	28,8	140	73	70
		2	3,4575	31,8	90	42	45
		3	3,4487	31,0	85	40	38
		12	3,4572	30,2	85	40	37

З аналізу даних, поданих у табл., випливає, що розрахункові значення з розподілу вмісту піролітичного вуглецю за товщиною стінки ущільнених вуглецевих композитів із точністю, не гірше 12 %, збігаються з дослідними результатами.

Висновки

Розроблено методику розрахунку розподілу концентрації реакційного газу (пропану) за довжиною плаского реактора з урахуванням його доставляння до нагрітих поверхонь, дифузії у пористу структуру вуглецевих композитів та розкладання реакційного газу з осадженням піролітичного вуглецю. Точність розрахунків за запропонованою методикою встановлено шляхом порівняння з дослідними значеннями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Скачков В. А. Определение кинетических параметров процесса осаждения пиролитического углерода / В. А. Скачков, Р. А. Шаповалов, В. И. Иванов // *Металлургия : научные труды ЗГИА*. — Запорожье : РИО ЗГИА, 2000. — Вып. 3. — С. 52—55.
2. Колесников С. А. Уплотнение углеродных заготовок путем пиролиза газа в промышленных печах / С. А. Колесников, В. И. Костиков, А. М. Васильева // *Химия твердого топлива*. — 1991. — № 6. — С. 114—122.
3. Математические модели процессов температурной обработки и уплотнения в производстве углеродных композиционных материалов / В. А. Скачков, В. Д. Карпенко, В. И. Иванов, Е. В. Скачков // *Вопросы атомной науки и техники*. — Харьков : 1999. — Вып. 4 (76). — С. 3—12.

4. Гурин В. А. Исследование газофазного уплотнения пироуглеродом пористых сред методом радиально движущейся зоны пиролиза / В. А. Гурин, И. В. Гурин, С. Г. Фурсов // Вопросы атомной науки и техники. — Харьков : 1999. — Вып. 4 (76). — С. 32—45.

5. Байгушев Владимир Владимирович. Технология производства композиционных углерод-углеродных материалов электротермического назначения : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.06 / Байгушев Владимир Владимирович. — Днепропетровск, 2006. — 140 с. — Библиогр. : С. 125—137.

6. Франк-Каменецкий Давид Альбертович. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. — М. : Наука, 1967. — 491 с.

Рекомендована кафедрою технології підвищення зносостійкості ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 22.10.2013

Скачков Віктор Олексійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри металургії чорних металів, **Іванов Віктор Ілліч** — старший науковий співробітник кафедри металургії чорних металів, e-mail: colourmet@zgia.zp.ua;

Бережна Ольга Русланівна — канд. техн. наук, доцент кафедри металургії кольорових металів.

Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя

V. O. Skachkov¹
V. I. Ivanov¹
O. R. Berezhna¹

Method of compression process calculation for porous structure of carbon composites in the flat reactor

¹Zaporizhia State Engineering Academy

The method of compression process calculation for carbon composites in the work volume of flat reactor is offered. Method provides determination of distribution of concentration of reactionary gas (propane) on length of reactor of the state type taking into account its delivery to the heated porous surfaces of carbon composites and following decomposition with formation of pyrolytic carbon on the surface of pores.

Keywords: carbon composite, flat reactor, compression, pyrolytic carbon, propane, calculation.

Skachkov Victor O. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Ferrous Metals
Ivanov Viktor I. — Senior Research Assistant of the Chair of Ferrous Metals, e-mail: colourmet@zgia.zp.ua.

Berezhna Olga R. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of the Chair of Non-Ferrous Metals

В. А. Скачков¹
В. И. Иванов¹
О. Р. Бережная¹

Методика расчета процесса уплотнения пористой структуры углеродных композитов в плоском реакторе

¹Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье

Предложена методика расчета процесса уплотнения углеродных композитов в рабочем объеме плоского реактора. Методика предусматривает определение распределения концентрации реакционного газа (пропана) по длине реактора указанного типа с учетом его доставки к нагретым пористым поверхностям углеродных композитов и последующего разложения с образованием пиролитического углерода на поверхности пор.

Ключевые слова: углеродный композит, плоский реактор, уплотнение, пиролитический углерод, пропан, расчет.

Скачков Виктор Алексеевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры металлургии черных металлов
Иванов Виктор Ильич — старший научный сотрудник кафедры металлургии черных металлов, e-mail: colourmet@zgia.zp.ua;

Бережная Ольга Руслановна — канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов.