

УДК 620.22:661.666

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.80473

МЕТОДИ ГАЗОФАЗНОГО УЩІЛЬНЕННЯ КАРБОНІЗОВАНИХ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ ПІРОВУГЛЕЦЕМ

© В. О. Скачков, С. А. Воденніков, В. І. Іванов, Т. М. Нестеренко, О. Р. Бережна

Виконано порівняльний аналіз методів ущільнення карбонізованих вуглепластиків піровуглецем із газової фази у термохімічних ректорах проточного типу. На базі розроблених моделей, що описують процеси ущільнення карбонізованих вуглепластиків як за стаціонарних, так і динамічних умов з примусовим та без нього надходженням реакційних газів у пористу структуру подано переваги та недоліки ізотермічних і термоградієнтних методів осадження піровуглецю на поверхні вуглепластиків за умов стаціонарності та пульсацій тиску реакційних газів

Ключові слова: ущільнення, піровуглець, ізотермічні, термоградієнтні методи, пульсуючий тиск, стаціонарні, динамічні процеси

The comparative analysis of compaction methods of carbonized carbon fibre reinforced plastics by pyrocarbon from a gas phase in thermal reactors of isothermal type is made. There are presented advantages and lacks of isothermal and thermogradient sedimentation methods of pyrocarbon on carbon fibre reinforced plastics surface at conditions of stationarity and pressure pulsations of reactionary gases on the base of the developed models, which describe the processes of carbon fibre reinforced plastics compression as at stationarity, so dynamic conditions with forced and without its entering of reactionary gases in porous structure

Keywords: compression, pyrocarbon, isothermal methods, thermogradient, pulsating pressure, stationary, dynamic processes

1. Вступ

Одержання вуглецевих композитів передбачає заповнення пористої структури карбонізованих вуглепластиків піровуглецем, що осаджується з газової фази під час піролізу вуглеводнів.

Процес ущільнення реалізують у проточних термохімічних ректорах. В об'ємі реакторів реалізують гомогенні процеси, а на нагрітих поверхнях відбуваються гетерогенні процеси. При цьому продукти гомогенних процесів і вихідний вуглеводень дифундують у пористу структуру карбонізованого вуглепластика та, розкладаючись на його нагрітих стінках, утворюють твердий залишок – піровуглець.

Вибір оптимального типу процесу заповнення пористої структури карбонізованих вуглепластиків для піролітичного ущільнення конкретних видів виробів базується на точному аналітичному аналізі відомих методів та є актуальною проблемою.

Реалізація оптимального процесу дозволить істотно скоротити тривалість заповнення пористої структури карбонізованого вуглепластика піровуглецем, зменшити собівартість і підвищити конкурентоспроможність виробів з вуглецевих композитів.

2. Літературний огляд

Вихідний вуглеводень (метан) внаслідок перебігу гомогенних процесів утворює комплекс насичених і ненасичених вуглеводнів та ряд радикалів [1, 2].

Порядок реакції осадження піровуглецю за вихідним вуглеводнем суттєво відрізняється від першого [3–7]. Проте за кожним індивідуальним вуглеводнем (продуктом гомогенних процесів) порядок утворення піровуглецю з високою мірою достовірності можна прийняти першим.

Відомі методи заповнення пор у карбонізованих вуглепластиках поділяють на дві великі групи: ізотермічні та термоградієнтні процеси [8–10].

Як за ізотермічних, так і за термоградієнтних умов реалізуються стаціонарні методи ущільнення піровуглецем, методи надходження реакційних газів пульсацією, методи примусового надходження реакційних газів у пористу структуру із заданою швидкістю [8, 10–12].

Відсутність узагальненого аналізу відомих методів піролітичного ущільнення та їх застосування для конкретних типів виробів є актуальним завданням.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – на підставі розроблених математичних моделей виконати порівняльний аналіз статичних і динамічних методів піролітичного заповнення пористої структури карбонізованого вуглепластика як за ізотермічних, так і за термоградієнтних умов.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні задачі:

- описати відомі процеси ущільнення пористої структури карбонізованих вуглепластиків математичними рівняннями;
- скласти для математичних рівнянь граничні умови та знайти кінцеві вирішення;
- виконати порівняльний аналіз відомих процесів ущільнення.

4. Побудова моделей процесів ущільнення

Фізико-хімічні процеси ущільнення пористих карбонізованих вуглепластиків здійснюють за допомогою різних технологічних схем. Під час аналізу таких схем розглядають модельну задачу. Пористу

структуру карбонізованих вуглепластиків уявляють прямолінійною циліндричною порою з ефективним радіусом r , яка розташовується перпендикулярно до поверхні матеріалу та має гладку, енергетично однорідну поверхню. Необхідно для модельної структури виконати математичний аналіз відомих методів піролітичного ущільнення.

Для модельного середовища, у припущенні про постійність концентрації та швидкості течії вуглеводнів, що реагують, за поперечним перерізом пори, а також про відсутність гомогенних процесів в об'ємі пори, загальне рівняння руху i -го вуглеводню за довжиною пори можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial l} \left(D_i \frac{\partial C_i}{\partial l} \right) - \frac{\partial}{\partial l} (W \cdot C_i) - \frac{2k_i}{r} C_i, \quad (1)$$

де C_i – концентрація i -го вуглеводню; W – швидкість конвективної течії газу за довжиною пори; D_i – коефіцієнт дифузії i -го вуглеводню; k_i – константа швидкості утворення піровуглецю з i -го вуглеводню, $k_i = k_{0i} \cdot \exp(-E_i/R \cdot T)$; k_{0i} – передекспонента; E_i – енергія активації; R – газова стала; T – температура процесу; τ , l – відповідно час і координата за довжиною пори.

Рівняння (1) припускає перенесення i -го вуглеводню за довжиною пори дифузійно та примусовою конвекцією з урахуванням розкладання вуглеводню на поверхні пори й осадженням піровуглецю.

Стационарний газотермічний процес без примусової конвекції реалізують у реакторі із зовнішнім нагріванням і постійною температурою за товщиною стінки карбонізованого вуглепластика.

Для зазначених умов рівняння (1) набуває вигляду [10]:

$$D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial l^2} = \frac{2k_i \cdot C_i}{r}. \quad (2)$$

Рівняння (3) доповнюють граничними умовами

$$C_i|_{l=0} = C_i^0; \quad (3)$$

$$C_i|_{l=\infty} = 0. \quad (4)$$

Умова (3) припускає відповідність концентрації i -го вуглеводню в устя пори та у потоці вуглеводнів з об'єму реактора до стінки пористого вуглепластика [11]; умова (4) вказує на відсутність концентрації активного газу наприкінці достатньо довгої пори.

Вирішення рівняння (2) з граничними умовами (3) і (4) можна записати як

$$C_i = C_i^0 \cdot \exp \left[- \left(\frac{2k_i}{r \cdot D_i} \right)^{0.5} \cdot l \right]. \quad (5)$$

Співвідношення (5) описує розподіл вуглеводню, що реагує, за довжиною пори з урахуванням його

розкладання на її нагрітій поверхні. В цьому разі швидкість осадження піровуглецю V_i з i -го вуглеводню за довжиною пори визначають як

$$V_i = k_i \cdot C_i. \quad (6)$$

Для стационарного ізотермічного процесу з примусовою конвекцією характерною умовою є вимушений потік вуглеводнів, що реагують, з постійною швидкістю W . Тоді рівняння (1) матиме вигляд [9]

$$D_i \frac{d^2 C_i}{dl^2} - W_i \frac{dC_i}{dl} - \frac{2k_i \cdot C_i}{r} = 0. \quad (7)$$

Вирішення рівняння (7) з граничними умовами (3) і (4) подають наступним співвідношенням

$$C_i = C_i^0 \cdot \exp \left[\frac{W_i}{2D_i} - \left(\frac{W_i \cdot 2r + 8k_i \cdot D_i}{4r \cdot D_i^2} \right)^{0.5} \right] \cdot l. \quad (8)$$

Стационарний термоградієнтний процес характеризується збільшенням температури від устя пори за її довжиною, при цьому для реакційного газу доступною є поверхня з меншою температурою. В цьому разі реакційний газ прямує у пору, як із зростаючою швидкістю дифузії, так і зростаючою швидкістю його розкладання на поверхні пори.

Закон змінювання температури за довжиною пори можна подати у вигляді

$$T = T_H \cdot \exp(\alpha \cdot l), \quad (9)$$

де T_H – температура в устя пори; $\alpha = 1/\delta \cdot \ln(T_B/T_H)$; δ – довжина пори; T_B – температура за довжиною пори δ .

Оскільки коефіцієнт дифузії є величиною, що залежить від температури, можна записати

$$D_i = D_i^H \cdot \left(\frac{T}{T_H} \right)^{1.5}, \quad (10)$$

де T – температура в точці пори з координатою δ ; D_i^H – коефіцієнт дифузії за температури T_H .

Підставляючи співвідношення (9) до рівняння (10), одержують

$$D_i = D_i^H \cdot \exp(1,5\alpha \cdot l). \quad (11)$$

Враховуючи умови стационарності та залежності (2), (9) і (11), рівняння (1) можна записати:

$$\frac{d^2 C_i}{dl^2} + \theta \frac{dC_i}{dl} - \frac{2k_0}{r \cdot D_i^H} \exp[K_i \cdot \exp(\alpha \cdot l) - \theta \cdot l] \cdot C_i = 0, \quad (12)$$

де $\theta = 1,5\alpha$; $K_i = -E_i/R \cdot T_H$.

Граничні умови для рівняння (12) можна подати як

$$C_i|_{l=0} = C_i^0; \quad (13)$$

$$\left. \frac{dC_i}{dl} \right|_{l=0} \leq 0. \quad (14)$$

В умові (14) знак рівності відповідає «жорсткому» режиму термоградієнта, знак нерівності – його «м'якому» режиму. «Жорсткий» режим характеризується перевищенням швидкості хімічного процесу піролізу вуглеводню над швидкістю дифузії; у «м'якому» режимі швидкість дифузії перевищує швидкість піролізу вуглеводню.

Для стаціонарного термоградієнтного процесу з примусовою конвекцією реакційних газів рівняння (1) з урахуванням умов (9)–(10) має вигляд [10]:

$$\frac{d^2 C_i}{dl^2} + \left[\theta - \frac{W_i}{D_i^H} \exp(-\theta \cdot l) \right] \frac{dC_i}{dl} - \frac{2k_0}{r \cdot D_i^H} \exp[K_i \cdot \exp(\alpha \cdot l) - \theta \cdot l] = 0. \quad (15)$$

Граничні умови для рівняння (15) мають вигляд співвідношень (14) і (15).

Розв'язання рівняння (15) записують у вигляді

$$C_i = C_i^0 \cdot \sin \operatorname{arctg}(\exp R) \cdot \exp(\sin^2 \operatorname{arctg} f_1(l) \cdot [1 - \exp(-2\theta \cdot l)]) \times \times R - f_1(l) + R \cdot \exp(-2\theta \cdot l), \quad (16)$$

де

$$f_1(l) = (1 - 0,25\theta^2) \cdot l + z \cdot \exp(\alpha - \theta) \times \times l \cdot (\exp[k_i \cdot \exp(\alpha \cdot l)] - \exp k_i;$$

$$R = \frac{W^2}{8\theta \cdot (D_i^H)^2};$$

$$z = \frac{2k_0}{(\alpha \cdot r \cdot D_i^H)}.$$

Вирішення (16) визначає розподіл концентрації вуглеводнів за довжиною пори для рівняння (12) у разі, коли $W = 0$.

Нестаціонарний процес з пульсуючим тиском реакційних газів в ізотермічних умовах характеризується рівномірним розподілом температури за товщиною карбонізованого вуглепластика, що ущільнюються, але вихідний реакційний газ подають за пульсуючим режимом.

Рівняння (1) для таких умов буде записано

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial l^2} - \frac{2k_i \cdot C_i}{r}, \quad (17)$$

де τ – тривалість процесу.

Граничні умови для рівняння (17) мають вигляд:

$$C_i(\tau)|_{l=0} = C_i^0 \cdot \cos(\omega \cdot \tau); \quad (17)$$

$$C_i(\tau)|_{l=\infty} = 0; \quad (18)$$

$$\left. \frac{dC_i}{d\tau} \right|_{\tau=0} = 0, \quad (20)$$

де $\omega = 2\pi / \Omega$ – кругова частота; C_i^0 – амплітуда пульсацій; Ω – період коливань.

Розв'язання рівняння (17) з урахуванням граничних умов (18)–(20) має вигляд:

$$C_i = C_i^0 \cdot \exp \left[- \left(\frac{r \cdot \omega^2}{D_i} + \frac{2k_i}{r \cdot D_i} \right)^{0,5} \cdot \cos \varphi \cdot l \right] \times \times \cos \left(\frac{l}{(r \cdot D_i)^{0,5}} \cdot \sin \varphi \right) \cdot \cos \omega \tau, \quad (21)$$

де

$$\varphi = 0,5 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{r \cdot \omega}{2k_i} \right).$$

Для нестаціонарного процесу з пульсуючим тиском газів в умовах термоградієнта рівняння (1) з урахуванням співвідношень (2), (9) і (10) можна записати

$$\frac{dC_i}{d\tau} = \frac{d^2 C_i}{dl^2} + \theta \frac{\partial C_i}{\partial l} - \frac{2k_0^i}{r \cdot D_i} \times \times \exp[K_i \cdot \exp(\alpha \cdot l) - \theta \cdot l] \cdot C_i = 0. \quad (22)$$

Граничні умови для рівняння (22) мають вигляд співвідношень (18)–(20).

Розподіл концентрації реагуючого газу за довжиною пори в нестаціонарному процесу з умовами (18)–(20) подається вирішенням

$$C_i = C_i^0 \cdot \sin \operatorname{arctg} \exp(f_2) \times \times \exp(\sin^2 \operatorname{arctg} f_2 \cdot (\gamma - 0,25\theta^2 - 1)) \times \times l - z \cdot \exp[2(\alpha - \theta)] \cdot l \times \times [\exp(k_i \cdot \exp(\alpha \cdot l)) - \exp k_i] - l \cdot \cos(\omega \cdot \tau), \quad (23)$$

де

$$f_2(l) = (1 + 0,25\theta^2 + \gamma) \cdot l - z \cdot \exp(\alpha - \theta) \times \times l \cdot [\exp(k_i \cdot \exp(\alpha \cdot l))] - \exp k_i;$$

$$\gamma = \omega \cdot j; \quad j = (-1)^{0,5}.$$

Нестаціонарний процес з пульсуючим тиском реакційних газів в умовах термоградієнта з примусовою конвекцією записують рівнянням

$$\frac{dC_i}{d\tau} = \frac{d^2C_i}{dl^2} + \left(\theta - \frac{W_i}{D_i^H} \cdot \exp(-\theta \cdot l) \right) \frac{\partial C_i}{\partial l} - \frac{2k_i^i}{r \cdot D_i^H} \times \exp[K_i \cdot \exp(\alpha \cdot l) - \theta \cdot l] \cdot C_i = 0. \quad (24)$$

Граничні умови для даного процесу відповідають співвідношенням (18)-(20).

Вирішення поставленої задачі (24) має вигляд:

$$C_i = C_i^0 \cdot \exp(k_i) \times \exp \left[\frac{1}{W} \cdot \left(\frac{4k_0^2}{r^2 \cdot \beta^2} \cdot \exp 2(\beta \cdot l + k_i) + \omega^2 \cdot l^2 \right)^{0.5} \right] \times \cos \arctg \left(\frac{\omega \cdot r \cdot \beta \cdot l}{2k_0} \cdot \exp(-k - \beta \cdot l) \right) \cdot \cos(\omega \cdot \tau), \quad (25)$$

де $\beta = \frac{k_i}{\delta} \cdot [\exp(\alpha \cdot \delta - 1)]$.

Вирішення (25) одержано за умови, коли $W \gg D_i^H$.

Для ізотермічного процесу змінювання швидкості осадження піровуглецю за довжиною пори подано на рис. 1. Криві відповідають рівнянню (6) з урахуванням вирішень (5) і (8).

5. Результати досліджень

Одержані результати показують, що кількість осадженого піровуглецю за довжиною пори зменшується та на достатній відстані від її устя процес заповнення пористого простору є практично відсутнім. Збільшення швидкості надходження реакційних газів у пору W якісного змінювання процесу осадження піровуглецю не забезпечує. Заповнення пористої структури карбонізованого вуглепластика триває до заростання устя пор.

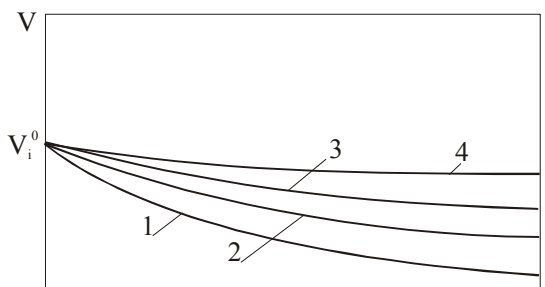


Рис. 1. Змінювання швидкості осадження піровуглецю за довжиною пори: 1 – $W_1=0$; 2 – W_2 ; 3 – W_3 ; 4 – W_4 . ($W_1 < W_2 < W_3 < W_4$)

В умовах термоградієнта концентрація реакційного газу за довжиною пори зменшується, що зумовлено процесом дифузії (рис. 2, а).

Константа швидкості утворення піровуглецю k збільшується у міру зростання відстані до устя пори та визначається параметром α (9). Із збільшенням різниці температур $\Delta T = T_B - T_H$ зростає швидкість утворення піровуглецю (рис. 2, б). За досить великим значенням α зростання шару піровуглецю походить із глибини

пори та завершується повним заповненням піровуглецем пористого простору карбонізованого вуглепластика. Накладення на процес дифузії примусового надходження реакційного газу із швидкістю W призводить до збільшення концентрації, а, отже, і швидкості осадження піровуглецю (рис. 3).

Ізотермічний процес ущільнення за умов тиску реакційного газу, що пульсує, подано вирішенням (21). Концентрація реакційного газу в кожній точці за довжиною пори змінюється у межах від максимального заповнення (рис. 4, лінія 1-1) до мінімального заповнення (рис. 4, лінія 1-3). У міру зростання відстані до устя пори амплітуда змінювання концентрації реакційного газу зменшується, а процес наближається до простого ізотермічного ущільнення.

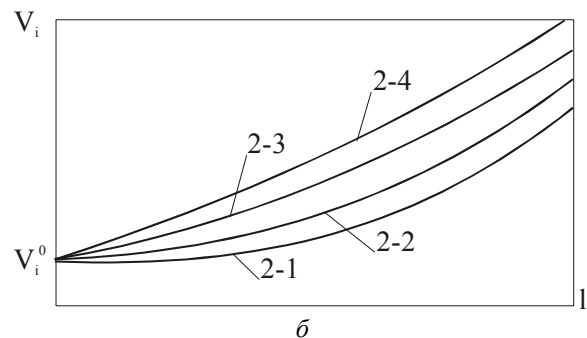
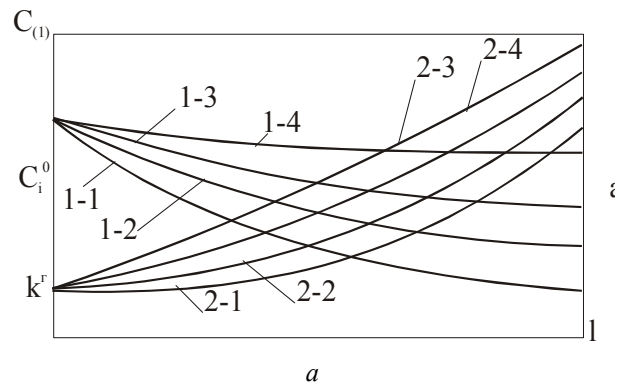


Рис. 2. Криві змінювання: а – концентрації реакційного газу (C_i) і константи швидкості (k_i) утворення %; б – швидкості осадження (V_i) піровуглецю за довжиною пори за умов термоградієнта; 1-1 – α_1 ; 1-2 – α_2 ; 1-3 – α_3 ; 1-4 – α_4 ; 2-1 – α_1 ; 2-2 – α_2 ; 2-3 – α_3 ; 2-4 – α_4

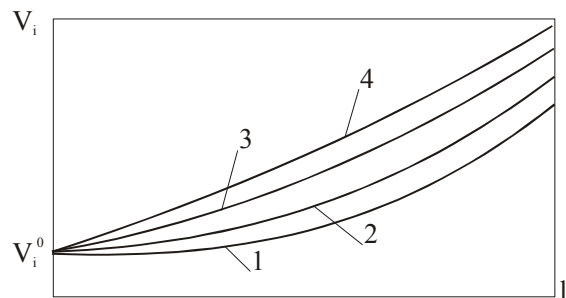


Рис. 3. Змінювання швидкості осадження піровуглецю в умовах термоградієнта для різних значень швидкості W надходження реакційного газу до пористої структури карбонізованого вуглепластика: 1 – $W_1=0$; 2 – W_2 ; 3 – W_3 ; 4 – W_4 . ($W_1 < W_2 < W_3 < W_4$)

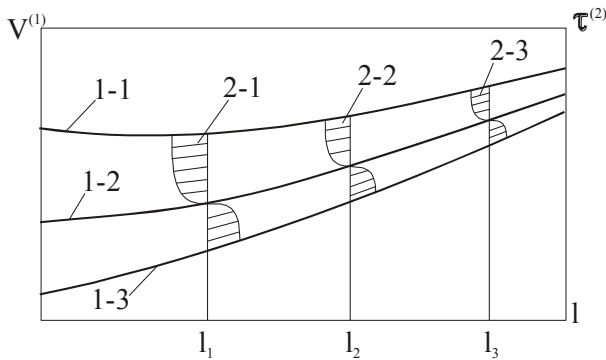


Рис. 4. Змінювання швидкості осадження піровуглецю за довжиною пори за ізотермічному процесі за умов тиску реакційного газу, що пульсує:
 1-1 – $\omega=8 \pi/T$; 1-2 – $\omega=0$; 1-3 – $\omega=8 \pi/T$; 2-1 – l_1 ;
 2-2 – l_2 ; 2-3 – l_3

Принципового змінювання процесу осадження піровуглецю пульсації тиску реакційних газів не вносять, збільшення швидкості осадження піровуглецю за довжиною пори не спостерігають, процес заповнення пори завершується після заростання устя пори. Автори роботи [12] також дістали такого висновку.

Термоградієнтний процес за умов тиску реагуючого газу, що пульсує, без примусового його надходження до пористої структури подано вирішенням (23), а з примусовим надходженням газу – вирішенням (25).

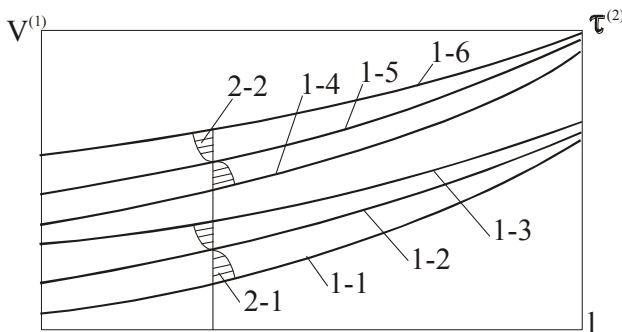


Рис. 5. Змінювання швидкості осадження піровуглецю за довжиною пори за умов термоградієнтного процесу із тиском газу, що пульсує: 1-1 – $\omega=8 \pi/T$; 1-2 – $\omega=0$; 1-3 – $\omega=-8 \pi/T$;
 1-4 – $\omega=8 \pi/T$; 1-5 – $\omega=0$; 1-6 – $\omega=-8 \pi/T$;
 2-1 – l_1 ; 2-2 – l_2

Графічне уявлення щодо змінювання швидкості осадження піровуглецю за довжиною пори наведено на рис. 5. Процес піролітичного ущільнення відповідає термоградієнтному процесу. В міру зростання відстані до устя пори вплив пульсації тиску реакційного газу знижується (криві 2-1, 2-2), проте збільшення швидкості W вимушеного надходження реакційного газу в пористу структуру зумовлює значне прискорення процесу заповнення пор піровуглецем.

6. Висновки

1. Використання процесів заповнення пористої структури вуглепластика піровуглецем із газової фази з тиском реакційного газу, що пульсує, не призводить

до зниження часу ущільнення та збільшення об'єму осадженого піровуглецю у пористій структурі.

2. Примусове надходження реакційного газу до пористої структури зі швидкістю W за умов ізотермічного процесу збільшує кількість осадженого піровуглецю в об'ємі вуглепластика, проте ефективність процесу обмежується часом заростання устя пор.

3. За умов термоградієнтного процесу примусове надходження реакційного газу зі швидкістю W збільшує швидкість осадження піровуглецю за довжиною пори та зумовлює зниження часу процесу ущільнення.

4. Для тонкостінного вуглепластика з відкритим доступом реакційних газів до обох поверхонь ізотермічний процес практично відповідає термоградієнтному; для товстостінного вуглепластика термоградієнтний процес є прийнятнішим.

Література

1. Макаров, К. И. Исследование кинетики термохимического превращения метана. Гетерогенные реакции [Текст] / К. И. Макаров, В. К. Печик // Кинетика и катализ. – 1975. – Т. XVI, Вып. 6. – С. 1484–1490.
2. Макаров, К. И. Исследование кинетики термохимического превращения метана. Гомогенно-гетерогенная реакция [Текст] / К. И. Макаров, В. К. Печик // Кинетика и катализ. – 1975. – Т. XVI, Вып. 6. – С. 1491–1500.
3. Магарил, Р. З. Образование углерода при термических превращениях индивидуальных углеводородов и нефтепродуктов [Текст] / Р. З. Магарил. – М.: Химия, 1973. – 240 с.
4. Дерягин, Б. В. Рост алмаза и графита из газовой фазы [Текст] / Б. В. Дерягин, Д. В. Федосеев. – М.: Наука, 1977. – 155 с.
5. Федосеев, Д. В. Гетерогенная кристаллизация из газовой фазы [Текст] / Д. В. Федосеев, Р. К. Жучко, А. Г. Гривцов. – М.: Наука, 1978. – 100 с.
6. Арефьев, Э. Ф. Исследование тормозящего действия водорода на процесс образования пироуглерода из метана при температуре 1000–1250 °С [Текст] / Э. Ф. Арефьев, Т. Д. Снегирева // Химия твердого топлива. – 1978. – № 3. – С. 41–43.
7. Теснер, П. А. О причинах нарушения кинетики первого порядка процесса образования пироуглерода из метана [Текст] / П. А. Теснер, Т. В. Текунова, Т. Д. Снегирева // Химия твердого топлива. – 1980. – № 4. – С. 114–119.
8. Фиалков, А. С. Межслоевые соединения и композиты на их основе [Текст] / А. С. Фиалков. – М.: Аспект Пресс, 1997. – 709 с.
9. Скачков, В. А. Низкотемпературное осаждение пиролитического углерода в пористых композиционных материалах [Текст] / В. А. Скачков, Р. А. Шаповалов, В. И. Иванов // Металлургия (Научні праці ЗДІА). – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2004. – Вып. 9. – С. 63–66.
10. Гурин, В. А. Исследование газофазного уплотнения пироуглеродом пористых сред методом радиально движущейся зоны пиролиза [Текст] / В. А. Гурин, И. В. Гурин, С. Г. Фурсов // Вопросы атомной науки и техники. – Харьков: ННЦ «ХФТИ», 1999. – Вып. 4 (76). – С. 32–45.
11. Golecki, I. Rapid vapor-phase densification of refractory composites [Text] / I. Golecki // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 1997. – Vol. 20, Issue 2. – P. 37–124. doi: 10.1016/s0927-796x(97)00003-x
12. Скачков, В. А. Математические модели процессов температурной обработки и уплотнения в производстве углеродных композиционных материалов [Текст] /

В. А. Скачков, В. Д. Карпенко, В. И. Иванов, Е. В. Скачков // Вопросы атомной науки и техники. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 1999. – Вып. 4 (76). – С. 3–12.

References

1. Makarov, K. I., Pechik, V. K. (1975). Research of kinetics thermo-chemical transformation of methane. Heterogeneous reactions. Kinetics and catalysis, XVI (6), 1484–1490.
2. Makarov, K. I., Pechik, V. K. (1975). Research of kinetics thermo-chemical transformation of methane. A homogeneous-heterogeneous reaction. Kinetics and catalysis, XVI (6), 1491–1500.
3. Magaril, Z. (1973). Formation of carbon at thermal transformations of individual hydrocarbons and oilproducts. Moscow: Chemistry, 240.
4. Deryugin, B. V., Fedoseev, D. V. (1977). Height of diamond and graphite from a gas phase. Moscow: Science, 155.
5. Fedoseev, D. V., Zhuchko, A. G., Gritvsov, R. K. (1978). Heterogeneous crystallization from a gas phase. Moscow: Science, 100.
6. Aref'ev, E. F., Snegireva, T. D. (1978). Research of hydrogen braking action on the process of pyrocarbon formation from methane at a temperature 1000–1250 °C. Chemistry of hard fuel, 3, 41–43.
7. Tesner, P. A., Tecunova T. V., Snegireva, T. D. (1980). About reasons of violation for first-order process kinetics of pyrocarbon formation of from methane. Chemistry of hard fuel, 4, 114–119.
8. Fialkov, A. S. (1997). Interstratified connections and composites on their basis. Moscow: Aspect Press, 709.
9. Scachkov, V. A., Shapovalov, R. A., Ivanov V. I. (2004). Low-temperature docomposition of pyrolytical carbon in porous composite materials. Metallurgy (Science labours ZDIA). Zaporizhzhja: RVV ZDIA, 9, 63–66.
10. Gurin, V. A., Gurin, I. V., Fyrsov, S. G. (1999). Research of gasphase compression by pyrocarbon of porous medium by a method radially locomotive area of pyrolysis. Questions of atomic science and technique. Kharkov: NNC «HFTI», 4 (76), 32–45.
11. Golecki, I. (1997). Rapid vapor-phase densification of refractory composites. Materials Science and Engineering: R: Reports, 20 (2), 37–124. doi: 10.1016/s0927-796x(97)00003-x
12. Scachkov, V. A., Karpenko, V. D., Ivanov V. I., Scachkov, D. V. (1999). Mathematical models of processes of temperature treatment and compression in the production of carbon composite materials. Questions of atomic science and technique. Kharkov: NNC «HFTI», 4 (76), 3–12.

Дата надходження рукопису 06.09.2016

Скачков Віктор Олексійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра металургії, Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006
E-mail: colourmet@zgia.zp.ua

Воденніков Сергій Анатолійович, доктор технічних наук, професор, перший проректор, Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006
E-mail: colourmet@zgia.zp.ua

Іванов Віктор Ілліч, старший науковий співробітник, кафедра металургії, Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006
E-mail: colourmet@zgia.zp.ua

Нестеренко Тетяна Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра металургії, Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006
E-mail: colourmet@zgia.zp.ua

Бережна Ольга Русланівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра металургії, Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006
E-mail: colourmet@zgia.zp.ua