

**Скачков Віктор Олексійович**, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4447-4641

**Бережна Ольга Русланівна**, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID 0000-0001-6728-5221

**Карпенко Ганна Володимирівна**, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3504-0283

**Варченко Дмитро Анатолійович**, аспірант, Запорізький національний університет, ORCID: 0009-0007-0993-0545

## НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ ПРОЦЕСИ ОДЕРЖАННЯ БОРВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Викладено підхід за способом отримання гідридів бору та визначення константи швидкості розкладання діборану в проточному термохімічному реакторі ізобарного типу за умов осадження твердого осаду як кристалічного бору на поверхні вуглецевих волокон. Термохімічний реактор ізобарного типу забезпечує контрольовані умови реакції шляхом підтримки постійного тиску усередині реактора. Це дозволяє стабілізувати режим реакції та забезпечити однорідну розподілення реагентів у системі. Методика визначення константи швидкості розкладання діборану базується на аналізі динаміки формування кристалічного бору на поверхні вуглецевих волокон. За допомогою експериментів і математичного моделювання встановлюються залежності між умовами реакції, швидкістю розкладання діборану та осадженням кристалічного бору. Отримані результати дозволяють оптимізувати процес отримання гідридів бору шляхом регулювання умов реакції та вибору оптимальних параметрів реактора. Це може призвести до покращення якості гідридів бору, забезпечуючи більш високу чистоту та однорідність продукту. Осадження кристалічного бору на поверхні вуглецевих волокон допомагає уникнути домішок та забруднень, що можуть вплинути на властивості гідридів бору. Крім того, використання проточного термохімічного реактора ізобарного типу дозволяє забезпечити стабільні умови реакції, що сприяє однорідному формуванню продукту. Запропонований підхід для отримання гідридів бору та визначення константи швидкості розкладання діборану в проточному термохімічному реакторі ізобарного типу з осадженням кристалічного бору на поверхні вуглецевих волокон відкриває перспективи для поліпшення якості цих матеріалів та розвитку їхнього використання у різних галузях науки й технологій.

Ключові слова: діборан, вуглецеві волокна, осадження, композиційні матеріали

*Вступ.* Одним із перспективних напрямків сучасного матеріалознавства є створення термостійких високоміцних композиційних матеріалів із низькою питомою вагою. До таких матеріалів відносяться борувуглецеві композити на основі вуглецевих волокон та борної матриці, що мають щільність у межах  $1,6 \dots 1,8 \text{ г/см}^3$  [1; 2].

Борну матрицю можна отримати шляхом осадження бору з газової фази у вигляді суміші бору трихлориду ( $\text{BCl}_3$ ) і водню [3]. Температура розкладання трихлориду бору знаходиться в межах  $1373 \dots 1773 \text{ К}$ , а необхідні характеристики бору реалізуються лише у вузькому температурному інтервалі допустимої зони розкладання трихлориду бора. Для зв'язування атомів хлору, що звільнилися, застосовується водень, при цьому має місце проблема утилізації газоподібного хлориду водню.

Найбільш перспективним є отримання борної матриці розкладанням діборану ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ), який отримують прямою взаємодією бору та водню при високих температурах. Процес

утворення діборану реалізується в середньотемпературній плазмі з газодинамічною фіксацією продуктів реакції, за якої швидкість охолодження досягає  $10^6$  град/с.

Найважливішим із гідридів бору є діборан – вихідний продукт для отримання інших гідридів бору, тому розробці методів його отримання приділялося багато уваги [4]. Відомо велика кількість різних способів отримання діборану, які можуть бути поділені на 3 основні групи [4; 5]: відновлення сполук бору воднем; відновлення галогенідів та деяких інших сполук бору простими та комплексними гідридами; розкладання боргідридів металів та інших похідних бороводнів.

Відмінністю способів першої групи від інших є те, що в результаті відновлення з'єднання бору воднем виходить суміш діборану з іншими газоподібними продуктами, що підлягає подальшому поділу, який зазвичай проводиться методом низькотемпературної ректифікації. Способи, що відносяться до другої та третьої груп, як правило, призводять до отримання нерозведеного діборану, так як другий продукт реакції в цих способах зазвичай твердий, але діборан, що отримується цими способами, може містити пари розчинника [4]. Промислове застосування знайшли способи першої групи, а другої та третьої – лабораторне.

Загальним недоліком всіх методів є необхідність очищення різних побічних продуктів або використаних для процесів розчинників. Уникнути появи різних побічних продуктів можна під час здійснення реакції взаємодії бору безпосередньо з воднем.

У роботі [6] описується отримання  $B_2H_6$  прямою взаємодією бору з воднем при 1000–1300 К, але досягти скільки-небудь прийнятної для практики виходу гідриду дослідникам не вдалося, що, мабуть, пов'язано з умовами проведення досліджень.

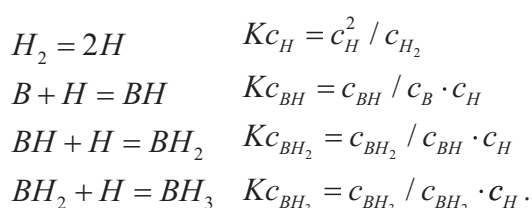
Виходячи з вищесказаного видно, що найперспективнішими будуть методи інтенсифікації прямого синтезу діборану взаємодією бору з воднем. Ця стаття присвячена термодинамічному аналізу взаємодії бору з воднем при температурах від 298 до 3500 К.

Отриманий діборан подають до реактора розкладання, в робочому обсязі якого в інтервалі температур 738...983 К відбувається осадження бору на каркасі з вуглецевих волокон, нагрітих прямим пропусканням електричного струму до температури 983 К, яке не супроводжується появою додаткових хімічно активних продуктів. У таких умовах одержують монокристалічну борну матрицю, яка рівномірно покриває вуглецевий каркас.

Практична реалізація процесу одержання боровуглецевих композитів вимагає знаходження точних значень технологічних параметрів: температури та концентрації діборану, а також швидкості його подачі в реактор.

*Постановка задачі.* Завданням цих досліджень є оцінка принципової можливості отримання гідридів бору при температурах вище 2000 К, визначення оптимального значення загального тиску та температури в системі, розрахунок мольних часток компонентів рівноважної суміші при оптимальних значеннях  $P$ ,  $T$  та співвідношенні В/Н, розробка методики визначення константи швидкості хімічної реакції і товщини дифузійного шару в процесі осадження бору на поверхні вуглецевих волокон у проточному реакторі ізотермічного типу на основі опису фізико-хімічних процесів, що відбуваються.

*Основна частина дослідження.* Хімічна рівновага у системі бор – водень визначатиметься такими реакціями:



Розрахувати рівноважний стан суміші можна за допомогою системи рівнянь:

$$\begin{aligned}
 Kc_H &= c_H^2 / c_{H_2} \\
 Kc_{BH} &= c_{BH} / c_B \cdot c_H \\
 Kc_{BH_2} &= c_{BH_2} / c_{BH} \cdot c_H \\
 Kc_{BH_3} &= c_{BH_3} / c_{BH_2} \cdot c_H \\
 c_{H_2} + c_H + c_B + c_{BH} + c_{BH_2} + c_{BH_3} &= 1 \\
 \frac{B}{H} &= \frac{c_B + c_{BH} + c_{BH_2} + c_{BH_3}}{2c_{H_2} + c_H + c_{BH} + 2c_{BH_2} + 3c_{BH_3}}.
 \end{aligned} \quad (1)$$

Оптимальні значення В/Н, відповідних констант рівноваги та загального тиску визначалися з довідкових даних [6] і склали 0,0333 та 100кПа відповідно.

Залежність констант рівноваги освіти ВН, ВН<sub>2</sub>, ВН<sub>3</sub> від температури представлена рисунку 1.

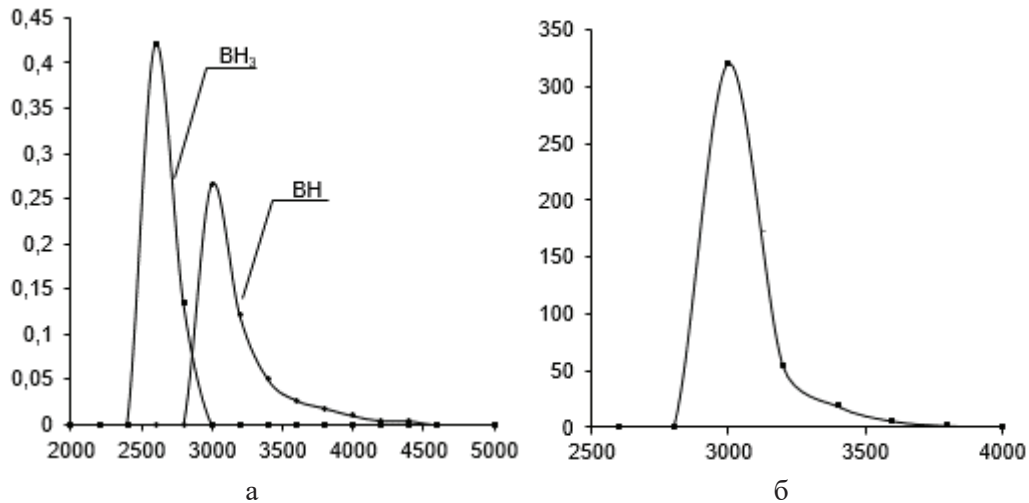


Рисунок 1 – Залежність  $K_c$  ВН та ВН<sub>3</sub> (а)  $K_c$  ВН<sub>2</sub> (б) від температури

Отримані значення  $K_c$  дозволяють спростити систему (1), так як, можна знехтувати наявністю ВН і ВН<sub>3</sub>, тоді рівняння набудуть наступного вигляду:

$$\begin{aligned}
 Kc_H &= c_H^2 / c_{H_2} \\
 Kc'_{BH_2} &= c_{BH_2} / c_B \cdot c_H^2 = Kc_{BH} \cdot Kc_{BH_2} \\
 c_{H_2} + c_H + c_B + c_{BH_2} &= 1 \\
 \frac{B}{H} &= \frac{c_B + c_{BH_2}}{2c_{H_2} + c_H + 2c_{BH_2}}
 \end{aligned} \quad (2)$$

Результати розрахунку подано на рис. 2.

Розрахунковим шляхом показано, що за 3000 К можливе отримання рівноважної газової суміші з мольною часткою ВН<sub>2</sub> до 3,5%, що у разі миттєвого охолодження дасть 1,5–1,9% В<sub>2</sub>Н<sub>6</sub> та інших гідридів бору.

Для практичного здійснення процесу необхідно використовувати плазматрон із подальшим охолодженням плазми (рис. 3). Швидкість охолодження має становити величину порядку  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  с/1000 К. Успішна реалізація такої схеми дасть змогу

отримувати гідриди бору без домішок інших сполук елементів, тобто схема очищення зведеться до розподілу різних гідридів.

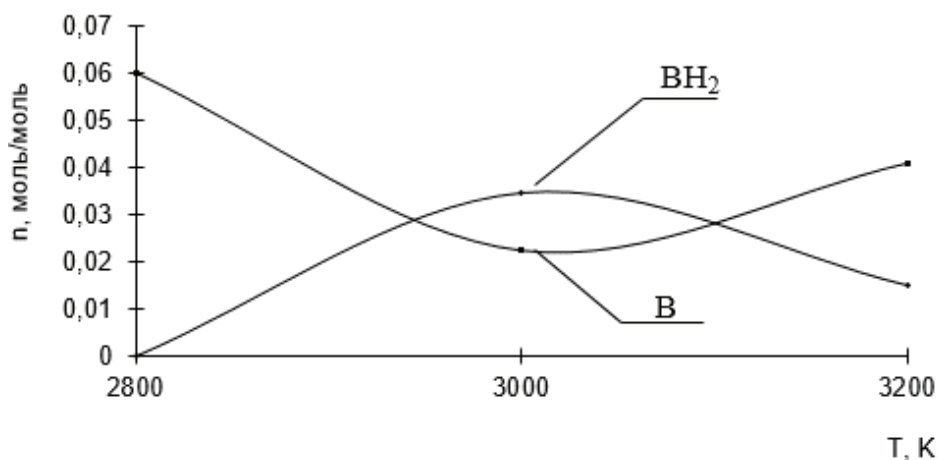
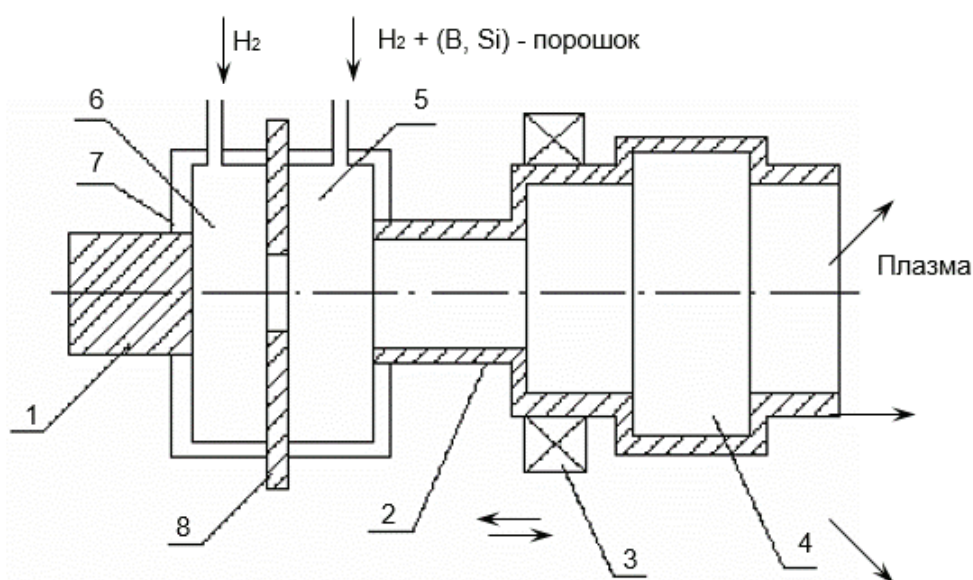


Рисунок 2 – Залежність рівноважних концентрацій  $\text{ВН}_2$  і від температури при  $\text{В/Н} = 0,0333$  і  $\text{Р} = 100\text{кПа}$



1 – катод; 2 – анод, 3 – магніт, 4, 5, 6 – вихрові камери;  
7 – ізолятори; 8 – міжелектронна вставка

Рисунок 3 – Схема плазматрону для отримання гідридів бору:

Для осадження борної матриці використовують термохімічний проточний реактор представлений на рисунку 3.

На вхід реактора даного типу подають гідрид бору, на виході реактора отримують діборан який не прореагував, а також продукти повного і неповного розкладання. Реактор для осадження бору є ізобарним, що дозволяє спростити моделювання даного процесу [7].

У реакторах даного типу реалізується конвективно-дифузійне перенесення маси газу, що реагує.

Рівняння перенесення речовини в умовах хімічного перетворення для поточного середовища має вигляд [8]:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + \operatorname{div} \vec{q}_{\text{диф},i} + \operatorname{div} \vec{q}_{\text{конв},i} = q_{\text{хим},i}, \quad (3)$$

де  $\rho_i$  – парціальна щільність  $i$ -го компонента середовища, що реагує;  $\vec{q}_{\text{диф},i}$  – вектор питомого потоку дифузійного перенесення маси  $i$ -го компонента;  $\vec{q}_{\text{конв},i}$  – вектор питомого конвективного перенесення  $i$ -того компонента;  $q_{\text{хим},i}$  – питома об'ємна продуктивність процесу хімічного перетворення;  $\tau$  – час процесу.

Питома об'ємна продуктивність процесу хімічного перетворення може бути описана співвідношеннями виду:

$$q_{\text{хим},i} = k_i \cdot \sum_{i=1}^N \rho_i^{n_i} \quad (4)$$

де  $k_i$  – константа швидкості хімічної реакції  $i$ -го компонента;  $n_i$  – порядок реакції по  $i$ -му компоненту.

Вектор питомого перенесення маси  $i$ -го компонента у разі дифузії та конвекції визначається відповідно до співвідношення:

$$\begin{aligned} \vec{q}_{\text{диф},i} &= -D_{iN} \cdot \nabla \rho_i \\ \vec{q}_{\text{конв},i} &= \vec{U} \cdot \rho_i \end{aligned} \quad (5)$$

де  $D_{iN}$  – коефіцієнт дифузії  $i$ -того компонента в газовому середовищі з  $N$  компонентами,  $\text{m}^2/\text{c}$ ;  $\vec{U}$  – швидкість потоку газового середовища.

Для зручності розгляду рівняння (3) подають через мольні концентрації і після підстановки співвідношень (4) і (5) отримують:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} + \operatorname{div} (\vec{U} \cdot C_i - D_{iN} \cdot \nabla C_i) = k_i \cdot \sum_{i=1}^N C_i^{n_i} \quad (6)$$

де  $C_i$  – концентрація  $i$ -го компонента обсягом реакційної середовища.

У разі коли відбувається хімічна взаємодія речовин і з'являється необхідність дослідження конвективно-дифузійного перенесення кожного компонента, складають систему, що містить  $N$  рівнянь типу (6), записаних для  $N$  концентрацій.

Вважаючи, що об'ємні реакції відсутні, рівняння (6) можна записати як

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} + \operatorname{div} (\vec{U} \cdot C_i - D_{iN} \cdot \nabla C_i) = 0. \quad (7)$$

Інтегрування рівняння (5) передбачає відомими початкові та граничні умови процесу.

Початкові умови описують розподіл концентрації за реакційним обсягом у початковий час. Граничні умови визначають умови хімічної взаємодії на межі сполучення реакційних газів та нагрітих поверхонь, її газопроникність та активність.

Щільність потоку компонентів газового середовища на реакційну поверхню визначається співвідношенням:

$$j_k^i = D_{iN} \cdot \left. \frac{\partial C_i}{\partial \Pi} \right|_{\Gamma} = q_{\text{г.хим.р}}^i \quad (8)$$

де  $q_{\text{г.хим.р}}^i$  – швидкість гетерогенної хімічної реакції;  $\Gamma$ ,  $\Pi$  – межа та нормаль реакційної поверхні відповідно.

Якщо швидкість реакції задають першим порядком, то одержують співвідношення:

$$q_{\text{г.хим.р}}^i = k_i^{\text{г}} \cdot C_0^i \cdot S_{\text{num}} \quad (9)$$

де  $k_i^{\text{г}}$  – константа швидкості гетерогенної реакції;  $C_0^i$  – концентрація  $i$ -го компонента газового середовища на поверхні;  $S_{\text{num}}$  – питома площа реакційної поверхні.

Очевидно, що концентрація реакційних газів у поверхні буде змінюватися доти, поки швидкість дифузії з обсягу реактора на реакційну поверхню і швидкість хімічних

реакцій на поверхні відрізнятимуться один від одного. З часом у реакційній поверхні встановиться стаціонарна концентрація реакційного газу, а швидкості дифузії та хімічних реакцій залишатимуться рівними. Якщо прийняти закон зміни концентрації від ядра реактора до лінійної реакційної поверхні, то градієнт концентрації визначатиметься рівнянням [5]:

$$\frac{dC}{d\Pi} = \frac{C_i - C_0}{\delta}, \quad (10)$$

де  $\delta$  – товщина дифузійного шару.

Підставляючи вирази (9) і (10) рівняння (8) отримують співвідношення між концентрацією газу в потоці і на питомій реакційній поверхні реактора:

$$D_{iN} \cdot \frac{(C_i - C_0^i)}{\delta} = S_{yo} \cdot k_i^z \cdot C_0^i. \quad (11)$$

З цього співвідношення виходить, що:

$$C_0^i = \frac{\beta_i \cdot C_i}{S_{num.} \cdot k_i^z + \beta_i}, \quad (12)$$

де  $\beta_i$  – константа швидкості дифузії ( $\beta_i = D_i/\delta$ ).

З метою подальшого спрощення рівняння (7) вводять такі припущення:

- розглядають круговий циліндричний реактор, для якого всі функції, що описують структуру газових потоків, не залежать від окружної координати;
- швидкість газового потоку спрямована вздовж осі реактора, а швидкість дифузії газів вздовж осі зневажливо мала;
- розглядають лише стаціонарний, встановлений та ізотермічний режим роботи реактора;
- усі гомогенні та гетерогенні реакції відповідають першому порядку.

В реакторі реакційною поверхнею служить площа поверхні вуглецевого волокна та трубчастого каркасу, на якому закріплено волокно. Враховуючи незначну товщину вуглецевого волокна, покладеного в напрямку радіусу до каркаса, і досить великі зазори між окремими волокнами, дифузійними процесами в обсязі волокна з високим ступенем достовірності можна знехтувати.

Питома поверхня вуглецевого волокна на одиницю довжини каркасу може бути записана як

$$S_{num.}^B = \frac{2m}{r \cdot \rho \cdot L}, \quad (13)$$

де  $m$  – маса вуглецевого волокна, покладеного по довжині каркаса;  $r$ ;  $\rho$  – радіус та щільність вуглецевого волокна відповідно;  $L$  – довжина укладання волокна на каркасі.

Питома реакційна поверхня одиниці довжини реактора може бути задана співвідношенням:

$$S_{num.} = \left( 2\pi \cdot R + \frac{2m}{r \cdot \rho \cdot L} \right), \quad (14)$$

де  $R$  – радіус трубчастого каркаса.

З урахуванням прийнятих припущень рівняння (7) можна записати у наступному вигляді:

$$\frac{d(U \cdot C_i)}{dz} + k_i^z \cdot \frac{\beta_i \cdot C_i}{S_{num.} \cdot k_i^z + \beta_i} = 0, \quad (15)$$

де  $U$  – швидкість потоку по осі реактора;  $z$  – координатна вісь, спрямована по осі реактора.

На реакційній поверхні реалізують процес осадження твердого осаду у вигляді полікристалічного бору за реакцією:



Процес розкладання діборану (16) відбувається у інтервалі температур 773...973 К появою газоподібного продукту – водню.

При проходженні цієї реакції концентрація діборану по довжині реактора зменшуватиметься, шляхом його розкладання та розведення воднем.

Задаючи ступінь розкладання діборану змінної  $\alpha$ , з урахуванням реакції (16), можна записати розподіл концентрації хімічних продуктів та речовин по довжині реактора:

$$C^{H_2} = 3\alpha \cdot C_{ex}^{B_2H_6}; \quad (17)$$

$$C^{B_2H_6} = C_{ex}^{B_2H_6} \cdot (1 - 4\alpha); \quad (18)$$

$$U = U_{ex} \cdot (1 + 2\alpha), \quad (19)$$

де  $C_{ex}^{B_2H_6}$  – концентрація діборану на вході в реактор;  $U_{ex}$  – швидкість газового потоку на вході в реактор.

З урахуванням співвідношень (17)-(19), рівняння (13) можна переписати у вигляді:

$$\left( \frac{2 + 16\alpha}{1 - 4\alpha} \right) \cdot \frac{d\alpha}{dz} + \frac{\Omega}{\theta + \beta} = 0, \quad (20)$$

$$\text{де } \Omega = \frac{k_{B_2H_6}^2 \cdot \beta}{U_{ex}}; \quad \theta = S_{num.} \cdot k_{B_2H_6}^2.$$

Для рівняння (20) граничну умову задають у вигляді:

$$\alpha|_{z=0} = 0. \quad (21)$$

Рішення рівняння (20) за умови (21) має вигляд:

$$4\alpha - 1,5 \ln(1 - 4\alpha) = \frac{\Omega \cdot z}{\theta + \beta}. \quad (22)$$

Ступінь розкладання діборану в умовах експерименту є величиною досить малою. У цьому випадку, розкладаючи логарифм до ряду Макларена і нехтуючи членами другого порядку малості, ступінь розкладання діборану можна записати у вигляді:

$$\alpha = \frac{\Omega \cdot z}{10 \cdot (\theta + \beta)}. \quad (23)$$

З рівняння (19) випливає:

$$\alpha|_{z=L} = 0,5 \left( \frac{U_{вих}}{U_{ex}} - 1 \right), \quad (24)$$

де  $U_{вих}$  – швидкість реакційних газів на виході з реактора.

З рівності співвідношення (23), записаного для  $z = L$ , та співвідношення (24) після нескладних перетворень можна записати:

$$k_{B_2H_6}^2 = \frac{5D_U \cdot \beta}{(\beta \cdot \alpha - 5D_U \cdot S_{num.})}, \quad (25)$$

де  $D_U = U_{вих} - U_{ex}$ .

Рівняння (25) визначає значення константи швидкості розкладання діборану на поверхні вуглецевих волокон, закріплених на трубчастому каркасі.

Вимірне значення швидкості осадження бору на поверхні вуглецевих волокон визначиться як:

$$W_l = \frac{\Delta m \cdot (z + \Delta z)}{\rho_B \cdot S_{y\delta} \cdot \Delta z \cdot \tau}, \quad (26)$$

де  $W_l$  – лінійна швидкість осадження бору;  $\Delta m$  – маса обложеного бору на довжині  $\Delta z$  у точці  $z$ ;  $\rho_B$  – питома вага бору.

Розрахункове значення швидкості осадження бору може бути обчислено з використанням співвідношення:

$$W_l = \frac{k_{B_2H_6}^z \cdot \beta \cdot C_{ex}^{B_2H_6} \cdot [1 - \alpha(z)] \cdot S_{num.}}{S_{num.} \cdot k_{B_2H_6}^z + \beta}. \quad (27)$$

З рівності правих частин співвідношень (26) та (27) випливає:

$$\beta = \frac{\Delta m}{\left[ C_{ex}^{B_2H_6} \cdot (1 - \alpha) \cdot \rho_B \cdot S_{num.} \cdot \Delta z \cdot \tau \right] - \frac{\Delta m}{k_{B_2H_6}^z \cdot S_{num.}}}. \quad (28)$$

Співвідношення (28) задає значення швидкості дифузії реакторних газів обсягу реактора на реакційну поверхню розкладання діборану. З урахуванням залежності  $\beta$  від коефіцієнта дифузії досить просто визначити товщину дифузійного шару.

*Висновок.* Запропоновано плазмохімічний метод отримання гідридів бору. На основі розв'язання задачі перенесення газового середовища у круговому проточному реакторі з розкладанням діборану на нагрітій поверхні вуглецевих волокон побудовано методику визначення констант швидкостей його розкладання та дифузії з об'єму реактора на поверхню вуглецевих волокон.

Плазмохімічний метод отримання гідридів бору є перспективним технологічним рішенням, оскільки він дозволяє контролювати процес отримання гідридів бору з високою точністю. Використання кругового проточного реактора з розкладанням діборану на нагрітій поверхні вуглецевих волокон забезпечує ефективне змішування газового середовища і збільшує площу контакту між реагентами, що сприяє високій швидкості реакції.

Методика визначення констант швидкостей розкладання діборану та дифузії з об'єму реактора на поверхню вуглецевих волокон є важливим кроком у розробці та оптимізації процесу отримання гідридів бору. Вона дозволяє встановити взаємозв'язок між фізичними параметрами реактора та швидкостями процесів, що відбуваються на його поверхні. Це дає змогу підібрати оптимальні умови реакції, забезпечити максимальну продуктивність та знизити втрати реагентів. Крім того, розроблена методика може бути використана для оптимізації процесу отримання гідридів бору, зокрема, для визначення оптимальних параметрів реактора та умов реакції. Це дозволяє знизити енергетичні витрати, підвищити виходи продукту та зменшити утворення бокових продуктів.

Таким чином, запропонована методика є важливим кроком у вдосконаленні плазмохімічного методу отримання гідридів бору. Загалом, запропонована методика визначення констант швидкостей розкладання діборану та дифузії впроваджує новий підхід до отримання гідридів бору, що є важливим матеріалом у багатьох галузях науки і технологій. Вона відкриває перспективи для поліпшення процесу отримання цих матеріалів і сприяє подальшому розвитку плазмохімічних методів синтезу гідридів бору.

### Бібліографічний перелік

1. Справочник по композиционным материалам / под ред. Дж. Любина. Москва : Машиностроение, 1988. 448 с.
2. Портной К.И., Салибеков С.Е., Светлов И.Л., Чубаров В.К. Структура и свойства композиционных материалов. Москва : Машиностроение, 1979. 252с.



3. Конкин А.А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы. Москва : Химия, 1972. 375с.
4. Жигач А.Ф., Станисевич Д.С. Химия гидридов. Ленинград : Химия, 1969. 676 с.
5. Девярых Г.Г., Зорин А.Д. Летучие неорганические гидриды особой чистоты. Москва : Наука, 1974. 206 с.
6. Сурис А.Л. Термодинамика высокотемпературных процессов. Москва : Metallurgy, 1985. 565 с.
7. Денисов Е.Т. Кинетика гомогенных химических реакций. Москва : Высшая школа, 1988. 392 с.
8. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. Москва : Наука, 1967. 491 с.

### References

1. Directory of composite materials / ed. by J. Lyubyn. Moscow : Mashinostroenie, 1988. 448 p.
2. Portnoi K.I., Salibekov S.E., Svetlov I.L., Chubarov V.K. Structure and properties of composite materials. Moscow : Mashinostroenie, 1979. 252p.
3. Konkin A.A. Carbon and other heat-resistant fibrous materials. Moscow : Chemistry, 1972. 375p.
4. Zhigach A.F., Stanysevych D.S. Chemistry of hydrides. Leningrad : Chemistry, 1969. 676 p.
5. Devyatykh H.G., Zorin A.D. Volatile inorganic hydrides of special purity. Moscow : Nauka, 1974. 206 p.
6. Suryas A.L. Thermodynamics of high-temperature processes. Moscow : Metallurgy, 1985. 565 p.
7. Denisov E.T. Kinetics of homogeneous chemical reactions. Moscow : Higher School, 1988. 392 p.
8. Frank-Kamenetsky D.A. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics. Moscow : Nauka, 1967. 491 p.

**Skachkov Viktor**, Professor, Doctor of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-4447-4641

**Berezhna Olga**, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0001-6728-5221

**Karpenko Hanna**, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-3504-0283

**Varchenko Dmytro**, Postgraduate Student, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0009-0007-0993-0545

### LOW-TEMPERATURE PROCESSES OF OBTAINING BORON-CARBON COMPOSITE MATERIALS

An approach based on the method of obtaining boron hydrides and determining the rate constant of diborane decomposition in a flow thermochemical reactor of the isobaric type under the conditions of deposition of a solid precipitate as crystalline boron on the surface of carbon fibers is outlined. An isobaric thermochemical reactor provides controlled reaction conditions by maintaining a constant pressure inside the reactor. This makes it possible to stabilize the reaction mode and ensure uniform distribution of reagents in the system. The method of determining the diborane decomposition rate constant is based on the analysis of the dynamics of the formation of crystalline boron on the surface of carbon fibers. With the help of experiments and mathematical modeling, the dependences between the reaction conditions, the rate of decomposition of diborane and the deposition of crystalline boron are established. The obtained results make it possible to optimize the process of obtaining boron hydrides by adjusting the reaction conditions and choosing the optimal parameters of the reactor. This can lead to an improvement in the quality of the boron hydrides, providing

---

higher product purity and uniformity. Deposition of crystalline boron on the surface of carbon fibers helps to avoid impurities and impurities that can affect the properties of boron hydrides. In addition, the use of a flow thermochemical reactor of the isobaric type allows to ensure stable reaction conditions, which contributes to the uniform formation of the product. The proposed approach for obtaining boron hydrides and determining the rate constant of diborane decomposition in a flow thermochemical reactor of the isobaric type with deposition of crystalline boron on the surface of carbon fibers opens up prospects for improving the quality of these materials and developing their use in various fields of science and technology.

Keywords: diborane, carbon fibers, deposition, composite materials

Стаття надійшла до редакції 01.04.2023 р.