

**ТЕПЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРУ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ  
КАПСУЛЬОВАНОГО ПІРОВУГЛЕЦЕМ КВАРЦОВОГО ПІСКУ ПРИ  
ПРОХОДЖЕННІ ПРОЦЕСУ ПІРОЛІЗУ МЕТАНУ**

**К.В. Сімейко, аспірант,**  
Інститут газу НАН України,  
вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, 03113, Україна,  
E-mail: kossims@mail.ru

Однією з значних переваг псевдозріджених систем є висока інтенсивність переносу тепла від шару до поверхні теплообміну (або в зворотному напрямі), що дає можливість застосовувати апарати з псевдозрідженим шаром у процесах, де необхідна висока інтенсивність теплообміну між реагентами. Створена в Інституті газу НАН України установка для одержання капсульованого піровуглецем кварцового піску, використовує реактор з електротермічним псевдозрідженим шаром (ЕПШ). Капсульований піровуглецем кварцовий пісок використовують для дослідження технології карботермічного відновлення з метою одержання високочистого кремнію. Визначення теплових характеристик реактору дозволяє оцінити теплообмін та ефективність роботи реактору.

**ВСТУП**

При проходженні процесу піролізу метану в реакторі електротермічним псевдозрідженим шаром (ЕПШ) важливу роль відіграє теплообмін в середині апарату. Дослідження теплових характеристик реактору дозволяє визначити структуру і характер розподілення електричної потужності, визначити шляхи для оптимізації теплової роботи реактору, тим самим оптимізувати технологію отримання напівпродукту для подальших досліджень технології одержання високочистого кремнію.

Завдяки високим значенням коефіцієнту тепловіддачі від шару до поверхні, (або навпаки) практично весь температурний напір зосереджений в безпосередній близькості до поверхні теплообміну. Проведені вимірювання в [1] показали, що при температурі поверхні нагрівача 148° С температура на відстані 1-2 мм від його поверхні складає 108-109 ° С, залишаючись практично незмінною по всьому псевдозрідженому шару. Згідно інших даних [2] весь перепад температур зосереджений на відстані близько 1 мм від поверхні теплообміну. Таким чином, різниця температур між псевдозрідженим шаром і поверхнею теплообміну практично дорівнює перепаду температури в «граничній плівці», яка дотикається до поверхні теплообміну. За межами цієї «плівки» і ділянці стабілізації у газорозподільчому пристрої, псевдозріджений шар, внаслідок інтенсивного перемішування твердої фази, представляє собою практичну ізотермічну систему навіть при значних габаритах [3]. Ця важлива властивість псевдозріджених систем дозволяє успішно використовувати їх для здійснення технологічних процесів, які потребують достатньо тонкого регулювання температури в шарі з одночасним підводом значних кількостей теплоти.

Реактор, який використовується для дослідів має оригінальну конструкцію і відсутні комплексні данні, щодо систематичної оцінки ефективності його роботи.

**ПОСТАВЛЕНЕ ЗАВДАННЯ**

Визначити основні теплові характеристики реактору під час процесу піролізу метану, дати оцінку ефективності роботи реактору, визначити напрями для оптимізації теплової роботи.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Процес піролізу метану проходить у реакторі з ЕПШ [4], який являє собою теплоізолюваний графітовий корпус з графітовим електродом, опущеним в шар електропровідних частинок, іншим електродом слугує корпус реактору. Для утворення псевдозрідженого шару подають метан, через графітовий електрод шар електропровідних частинок та корпус апарату проходить електричний струм. В наслідок проходження струму через електропровідні частинки утворюються мікроплазмові розряди, які нагрівають реактор до необхідної температури. Для розігріву реактору до температури піролізу (870-1100°C) використовували електродний графіт, а після виходу на режим, графіт поетапно заміщували кварцовим піском. Одержаний капсульований піровуглецем кварцовий пісок в подальшому використовують для дослідження процесу карботермічного відновлення з метою одержання високочистого кремнію.

Число Нуссельта ( $Nu$ ) – один з основних критеріїв подібності теплових процесів, який характеризує відношення між інтенсивністю теплообміну за рахунок конвекції і інтенсивністю теплообміну за рахунок теплопровідності.

Для апаратів з псевдозрідженим шаром розраховують критерій Нуссельта для поверхні теплообміну

$$Nu = ( \times D_a ) / , \quad (1)$$

де, – коефіцієнт тепловіддачі,  $D_a$  – діаметр реакційної камери, – коефіцієнт теплопровідності метану.

Вважається, що основним термічним опором є плівка газу біля поверхні теплообміну. Від товщини цієї плівки  $n$  (через яку тепло передається шляхом теплопровідності) залежить величина коефіцієнту тепловіддачі

$$= / . \quad (2)$$

Для реактору з електротермічним псевдозрідженим шаром при проходженні процесу піролізу метану  $Nu = 105$ . Число Нуссельса, яке більше 100, вказує на сильний конвективний тепловий потік і турбулентну течію.

Число Стентона ( $St$ ) – один з критеріїв подібності теплових процесів, який характеризує інтенсивність дисипації (перехід частини енергії впорядкованих процесів (кінетичної енергії тіла, що рухається, енергії електричного струму і т.д.) в енергію неупорядкованих процесів, у кінцевому випадку в тепло) енергії в потоці рідини чи газу

$$St = / (w \times c \times ), \quad (3)$$

де  $w$  – швидкість зріджуючого агента,  $c$  – теплоємність метану, – питома вага метану,  $St = 787,5$ . Даний коефіцієнт вказує високу степінь перетворення енергії електричного струму в тепло. Розрахунок проводився за формулами з [3,5].

Для розрахунку значень температури під час проведення дослідів, з урахуванням похибок, застосовувалась програма Microsoft Excel. Розраховані значення температури та критерії похибки наведені в табл. 1.

Динаміка нагріву реактору розраховувалась з експериментальних даних, для значень температури більше 800° С має орієнтовний характер, оскільки у різних експериментах досліджувались різні теплові режими. Максимальна температура, яку досягали в експериментах дорівнює 1140°C. За даними таблиці 1 був побудований графік залежності температури від часу нагріву (рис.1).

Таблиця 1 - Значення температури та критерії похибки

Час, хв.	Температура, °C	Q -критерій	-критерій
0	20,000		
15	198,600	0,692	1,264
30	321,400	0,188	1,360
45	447,429	0,289	1,204
60	485,500	0,035	0,901
75	619,000	0,143	1,093
90	637,167	0,086	1,756
105	676,429	0,111	1,278
120	695,333	0,140	1,630
135	788,000	0,185	1,566
150	804,571	0,058	1,502
165	818,667	0,225	1,587
180	866,000	0,754	1,509
210	866,571	0,258	1,707
225	880,000	0,044	1,084
240	890,571	0,079	1,285
255	913,400	0,157	0,960
270	936,000	0,461	1,439
285	991,400	0,818	1,183
300	1001,000	0,673	1,434

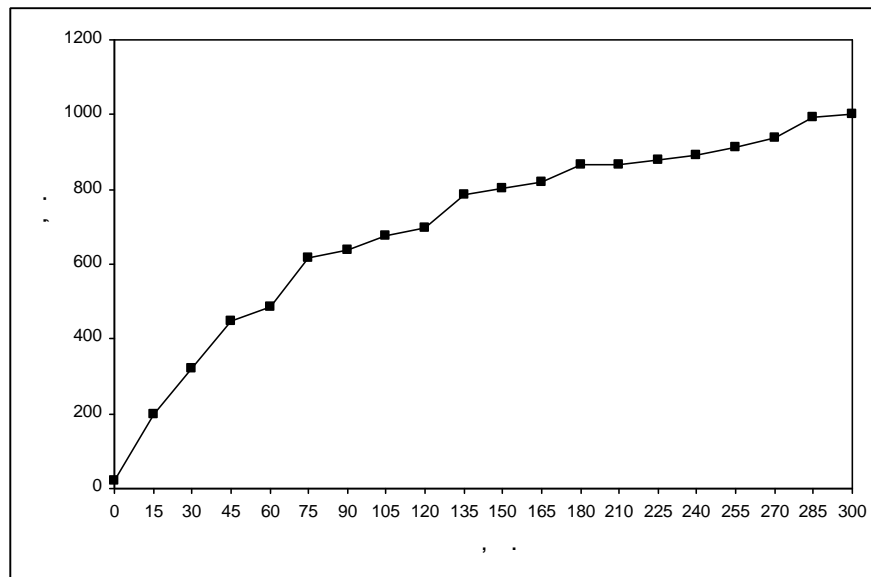


Рисунок 1 - Динаміка нагріву реактору

Зменшення швидкості нагріву після 800° пояснюється проходженням ендотермічних реакцій в реакторі установки, а також контролювання температури в деяких експериментах з яких були взяті данні.

Для оцінки теплового ККД реактору, були проведені розрахунки теплового балансу. Результати розрахунків теплового балансу наведені в табл. 2.

З результатів розрахунку теплового балансу, можна зазначити, що значні втрати тепла з газами, що виходять з реактору та втрати з охолоджувальною водою. Дисбаланс невеликий, що відповідає обраній потужності для даного процесу.

Термічний ККД дослідного реактора розраховується як відношення корисно витраченого тепла до загального об'єму тепла, %

$$\text{ККД} = (Q_1 + Q_2 + Q_3) / Q_0 = 55,09 \% .$$

Таблиця 2- Тепловий баланс реактору

Кількість введеного тепла			Кількість витраченого тепла		
Назва	Вт	%	Назва	Вт	%
Витрачена електрична потужність	18000	100	Витрата тепла на нагрів газу, $Q_1$	6020	33,44
			Витрата тепла на покриття ендотермічних ефектів реакцій $Q_2$	1558,67	8,66
			Витрата тепла на нагрів завантажувального кварцового піску $Q_3$	2338,41	12,99
			Втрати тепла з охолоджувальною водою, $Q_4$	3475,19	19,31
			Втрати тепла через теплоізоляцію реактора, $Q_5$	472,35	2,63
			Втрати тепла з газами, які виходять з реактору, $Q_6$	4137,25	22,98
			Втрати тепла з капсульованим піроуглецем кварцовим піском, який вивантажується, $Q_7$	188,24	1,04
			Дисбаланс, $Q$	-190,11	-1,05
Всього:	18000	100	Всього:	18000	100

#### ВИСНОВКИ

Після проведених дослідів, обробки одержаних даних та проведених розрахунків можна зазначити наступне: число Нуссельса вказує про сильний конвективний тепловий потік і турбулентну течію, коефіцієнт Стентона вказує високу степінь перетворення енергії електричного струму в тепло, з графіка динаміки нагріву видно, що в середньому вихід на режим  $>800^{\circ}\text{C}$  проходить за 135 хвилин, з даних теплового балансу можна зазначити, що при модернізації реактору потрібно приділити увагу втратам тепла з охолоджувальною водою та з газами, що виходять з реактору. Високе значення термічного ККД вказує на високу ефективність роботи реактору.

#### ТHERMAL CHARACTERISTICS OF THE REACTOR FOR QUARTZ SAND ENCAPSULATED BY PYROCARBON WHILE PASSING THE METHANE PYROLYSIS PROCESS

*K.V. Simeyko,*  
*Gas Institute of National Academy of Science of Ukraine,*  
*39, Degtyarivska Str., Kiev, 03113, Ukraine,*  
*E-mail: kossims@mail.ru*

*One of the significant advantages of fluidized systems is high intensity heat transfer from the layer to the surface of heat exchange (or in opposite direction), allowing to use the apparatus with fluidized bed in processes where high heat exchange intensity between the reactants is needed. Facility for the production of quartz sand encapsulated by pyrocarbon developed by the Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine uses the reactor with*

*an electrothermal fluidized bed. Quartz sand encapsulated by pyrocarbon is used to research the carbothermic reduction technology for producing of high purity silicon. Determination of the thermal characteristics of the reactor allows assessing the heat exchange intensity and efficiency of the reactor.*

#### **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Забродский С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдоожигеном слое. – Минск: Госенергоиздат, 1963. – 95 с.
2. Fetting F. Dechema Monograph. – 1955. – Vol. 24, № 283. – 146 p.
3. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Кваша В. Б. Основы техники псевдоожигения. - М: 1967. – 664 с.
4. Богомолов В.О. Реактор для піролізу газоподібних вуглеводнів / Богомолов В. О., Бондаренко Б. І., Кожан О. П., Сімейко К. В. // Патент України на корисну модель № 83147, від 27.08.2013.
5. Расчеты аппаратов кипящего слоя / под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. – Л. : Химия, 1986. – 352 с.

*Надійшла до редакції 2 жовтня 2013 р.*