

Приборы и оборудование

УДК 621.36 :66.096.5

Семейко К.В., канд. техн. наук, **Сидоренко Н.А.**, аспирант
Институт газа НАН Украины, Киевв
ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: k_simeyko@ukr.net

Теплофизические характеристики реактора с электротермическим псевдооживленным слоем и комбинированным способом нагревания

Для улучшения технологических особенностей и эффективности высокотемпературной обработки диэлектрических материалов разработана конструкция реактора с электротермическим псевдооживленным слоем с комбинированным способом нагревания. Основным назначением данного реактора является процесс нанесения пироуглеродного покрытия на кварцевый песок. Приведена принципиально-технологическая схема процесса. В дальнейшем кварцевый песок, покрытый пироуглеродом, будет применяться для получения чистого карбида кремния. Разработана методика расчета теплового баланса, которая позволяет оценить коэффициент полезного действия реактора. Подобрана методика расчета критериев подобия для возможности сравнения эффективности теплообмена в разработанном реакторе с другими аппаратами для термохимических процессов. Предложено описание теплообмена между псевдооживленным слоем и электродом. *Библ. 17, рис. 2.*

Ключевые слова: электротермический псевдооживленный слой, пироуглерод, карбид кремния, тепловой баланс, критерии подобия.

Обработка, синтез материалов и веществ в реакторах с электротермическим псевдооживленным слоем (ЭТПС) являются перспективными и развивающимися технологиями, области применения которых достаточно велики. Важными преимуществами указанных технологий перед другими способами синтеза материалов является высокая интенсивность внутреннего и внешнего тепло- и массообмена в кипящем слое, однородность слоя и технологически важная возможность работы в непрерывном режиме [1, 2].

Многие реакции синтеза материалов в кипящем слое протекают при высоких температурах, поэтому для осуществления таких реакций необходим источник нагрева. В ЭТПС, состоя-

щем из проводящих частиц, такой источник реализуется в результате выделения джоулевой теплоты при протекании тока между электродами, погруженными в слой [3]. При этом обеспечивается высокая энергетическая эффективность процессов. В классическом варианте использования реакторов с ЭТПС применяется установка электродов в реакционной зоне реактора [4–9]. При прохождении электрического тока через слой псевдооживленных частиц нагревание проходит за счет их электрического сопротивления, а при более высоких температурах на процесс существенно оказывает влияние плазма микроарзряда [6, 9]. Однако, обязательным условием нагревания частиц является

их электропроводность, поэтому данный тип реактора достаточно проблематично применять к материалам-диэлектрикам.

Одним из процессов, в которых необходима высокотемпературная обработка диэлектрического материала, является процесс нанесения пироуглеродного покрытия на частицы кварцевого песка. Данный процесс является одной из стадий разрабатываемой технологии получения чистого карбида кремния, который применяется в передовых направлениях современной науки и техники (атомная энергетика, электроника и полупроводниковая техника, керамические и полимерные композитные материалы, авиа- и космические технологии, топливные элементы) [10, 11].

В Институте газа НАН Украины проводились исследования по нанесению пироуглеродных покрытий на частицы кварцевого песка в ЭТПС. При их нагревании пропусканием электрического тока через электроды, установленные в середине реакционной зоны [8], было отмечено негативное влияние дробленого электродного графита (который использовался для первоначального нагрева кварцевого песка) на чистоту продукта. При применении внешнего нагрева [12] снижалась эффективность процесса, поскольку в данном случае исключается высокотемпературное воздействие плазмы микрозаряда. Так как при проведении процесса кварцевый песок покрывается пироуглеродом и приобретает электропроводность, было решено объединить вышеописанные способы нагревания. Для этого в Институте газа НАН Украины был разработан реактор с комбинированным способом нагревания [13]. Схема реактора приведена на рис.1.

Реактор при термической обработке диэлектрических материалов работает следующим образом. Через штуцер 19 в нагревательную камеру 5 подают инертный газ для защиты от окисления нагревательного элемента 6. Через газопроводные трубки 16 и газораспределительные колпачки 17 для создания псевдооживленного слоя подают инертный или реакционный газ (в зависимости от процесса), после этого реакционный газ подают через патрубок 8 в очиститель 9 и в патрубок для выхода газа во внешнюю среду 11, после чего его сжигают или просто выводят в атмосферу. Через бункер 23 и трубу 22 загружают обрабатываемый материал. Через клемму 21 подают ток на нагревательный элемент 6, где за счет электросопротивления его нагревают, при этом нагревают и реакционную камеру 7, а ток отводят через клемму 20. Материал выгружают через трубу 24 и холодильник 25. Температуру измеряют с помощью

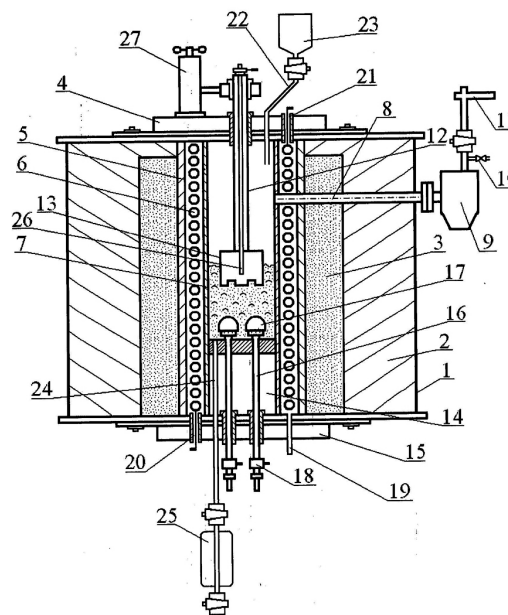


Рис.1. Реактор с ЭТПС с комбинированным способом нагревания: 1 — цилиндрический корпус; 2 — внешняя теплоизоляция; 3 — внутренняя теплоизоляция; 4 — верхняя водоохлаждающая крышка; 5 — нагревательная камера; 6 — нагревательный элемент; 7 — реакционная камера; 8 — патрубок для выхода газа; 9 — очиститель циклонного типа; 10 — кран для отбора проб газа на анализ; 11 — патрубок для выхода газа на сжигание; 12 — электрод; 13 — графитовая «корона»; 14 — воздушная камера; 15 — нижняя водоохлаждающая крышка; 16 — газопроводные трубки; 17 — газопроводные колпачки; 18 — клеммы; 19 — штуцер для подачи инертного газа; 20, 21 — клеммы для подачи тока на нагревательный элемент; 22 — труба для загрузки материала; 23 — бункер; 24 — труба для выгрузки материала; 25 — холодильник; 26 — термopара; 27 — механизм регулировки высоты электрода.

термопары 26. Пробу на анализ реакционного или инертного газа берут через кран 10. Когда в процессе нагревания диэлектрические материалы меняют свои свойства на электропроводящие, тогда через электрод 12, слой материала в реакционной камере 7, газораспределительные колпачки 17, газопроводные трубки 16 и клеммы 18 подают ток. Высоту электрода 12 регулируют механизмом 27.

На рис.2.приведена схема работы установки при использовании реактора для нанесения пироуглеродного покрытия на кварцевый песок.

При высокой температуре тепло переносится молекулярной теплопроводностью через газовую пленку и излучением. Кондуктивный коэффициент теплообмена возрастает с увеличением температуры поверхности, а радиационный определяется температурой псевдооживленного слоя. При протекании химических реакций суммарная теплопроводность газовой пленки возрастает в несколько раз по сравнению с молекулярной вследствие термического

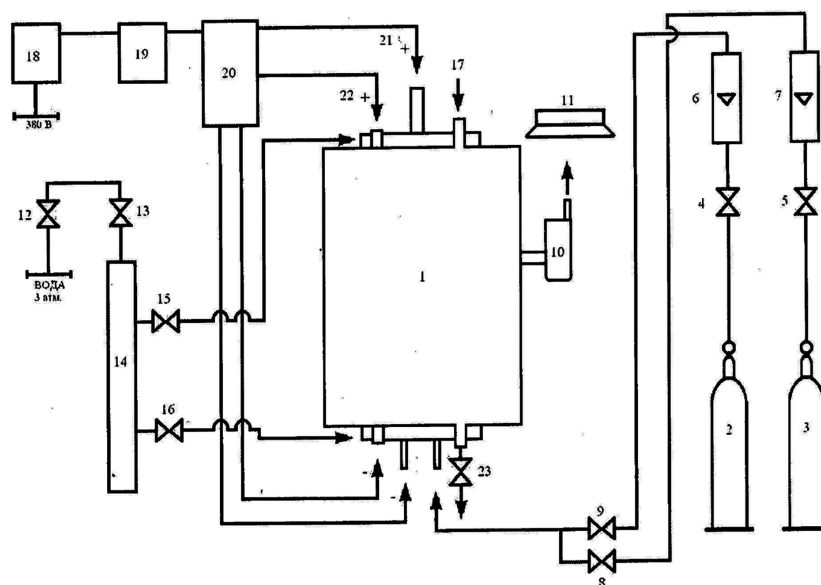


Рис.2. Принципиальная технологическая схема лабораторной установки с комбинированным нагревателем ЭТПС для процесса получения чистого карбида кремния: 1 – реактор с ЭТПС; 2 – баллон с азотом; 3 – баллон с пропан-бутаном; 4, 5, 8, 9 – вентили; 6, 7 – ротаметры; 10 – циклонный очиститель; 11 – вытяжка; 12, 13, 15, 16 – шаровые краны; 14 – распределитель воды; 17 – бункер для загрузки материала; 18, 19 – автоматические выключатели; 20 – силовой трансформатор; 21 – клемма на электрод; 22 – клемма на нагреватель; 23 – система выгрузки.

разложения и диссоциации молекул на атомы и радикалы. Поэтому при высокой температуре нагрева в суммарном теплообмене кондуктивный перенос является преобладающим. При низкой температуре поверхности, погруженной в высокотемпературный псевдооживленный слой, лучистый перенос тепла может превысить кондуктивный.

Расчет теплового баланса основывается на методике, описанной в [12], однако усовершенствованной под данный тип реактора с ЭТПС.

Уравнение теплового баланса реактора с ЭТПС выглядит следующим образом:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11} \pm \Delta Q. \quad (1)$$

Значения слагаемых описаны ниже:

Q_0	– Количество введенной теплоты
	Потери теплоты:
Q_1	– на нагрев реакционного газа
Q_2	– на нагрев азота в реакционной камере
Q_3	– на нагрев азота в нагревательной камере
Q_4	– на покрытие эндотермических эффектов реакций
Q_5	– на нагрев загружаемого кварцевого песка
Q_6	– с охлаждающей водой
Q_7	– через теплоизоляцию реактора
Q_8	– с реакционным газом, выходящим из реактора
Q_9	– с азотом, выходящим из реакционной камеры
Q_{10}	– с азотом, выходящим из нагревательной камеры
Q_{11}	– с выгружаемым песком
ΔQ	– Дисбаланс

Количество введенной теплоты рассчитывается по следующей формуле:

$$Q_0 = Q_0^1 + Q_0^2, \quad (2)$$

где Q_0^1 – количество теплоты, введенной в результате прохождения электрического тока через электроды и частички псевдооживленного слоя; Q_0^2 – количество теплоты, введенной через внешний нагреватель.

Q_0^1 определяется по вольтамперной характеристике:

$$Q_0^1 = U I, \quad (3)$$

где U – напряжение, В; I – сила тока, А.

Q_0^2 определяется по закону Джоуля-Ленца:

$$Q_0^2 = I^2 R \tau, \quad (4)$$

где R – электросопротивление нагревательного элемента (никелевой обмотки), Ом; τ – время нагревания, ч.

$$Q_1 = G_r C_r (T_2 - T_1), \quad (5)$$

где G_r – расход реакционного газа, м³/ч; C_r – теплоемкость реакционного газа, ккал/(м³·К), теплоемкость реального газа; T_2 – температура процесса, К, T_1 – температура реакционного газа перед подачей в реактор, К.

$$Q_2 = G_a^1 C_a (T_2 - T_1), \quad (6)$$

где G_a^1 – расход азота при подаче в реакционную камеру, $\text{м}^3/\text{ч}$; C_a – теплоемкость азота, $\text{ккал}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$, T_2 – температура процесса, К ; T_1 – температура азота перед подачей в реактор, К .

$$Q_3 = G_a^2 C_a (T_2 - T_1), \quad (7)$$

где G_a^2 – расход азота при подаче в нагревательную камеру, $\text{м}^3/\text{ч}$; C_a – теплоемкость азота, $\text{ккал}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$; T_2 – температура процесса, К ; T_1 – температура азота перед подачей в реактор, К .

$$Q_4 = G_r \Delta b_i c_i \Delta H_{i298}. \quad (8)$$

Здесь

$$\Delta b_i = b_{\text{ин}} - b_{\text{ик}}, \quad (9)$$

где $b_{\text{ин}}$ – начальная доля реакционного газа, % (об.); $b_{\text{ик}}$ – конечная доля реакционного газа, % (об.); c_i – плотность реакционного газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; ΔH_{i298} – теплота образования компонента, $\text{ккал}/\text{кг}$.

$$Q_5 = G_{\text{зп}} C_{\text{кп}} (T_2 - T_1), \quad (10)$$

где $G_{\text{зп}}$ – скорость загрузки кварцевого песка, $\text{кг}/\text{ч}$; $C_{\text{кп}}$ – теплоемкость кварцевого песка, $\text{ккал}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; T_1 – температура загружаемого песка, К ; T_2 – температура процесса, К .

$$Q_6 = G_v C_{\text{кп}} (T_2 - T_1), \quad (11)$$

где G_v – расход воды, $\text{м}^3/\text{ч}$; C_v – теплоемкость воды, $\text{ккал}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$; T_1, T_2 – начальная и конечная температуры воды, К .

$$Q_7 = (T_1 - T_2) / \left[\sum_1^i (L_i / (\lambda_i F_i)) \right], \quad (12)$$

где T_1 – температура внешней стенки реактора, К ; T_2 – температура процесса, К ; L_i – толщина слоя теплоизоляции, м ; λ_i – теплопроводность материала теплоизоляции, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C})$; F_i – площадь поверхности слоя теплоизоляции, м^2 .

$$F_i = (F_{\text{ЗШ}} + F_{\text{СШ}} + F_{\text{ВШ}}), \quad (13)$$

где $F_{\text{ЗШ}}$ – площадь поверхности внешнего слоя теплоизоляции (теплоизоляционная вата), м^2 ; $F_{\text{СШ}}$ – площадь среднего слоя (стальная перегородка), м^2 ; $F_{\text{ВШ}}$ – площадь поверхности внутреннего слоя теплоизоляции (технический уголь), м^2 .

Соответственно конструкции реактора для расчета разделим реактор на три зоны: Q_7^1, Q_7^2, Q_7^3 :

$$Q_7 = Q_7^1 + Q_7^2 + Q_7^3. \quad (14)$$

$$Q_8 = G_r C_r (T_2 - T_1), \quad (15)$$

где C_r – теплоемкость газа, $\text{ккал}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$; T_2 – температура газа на выходе из реактора, К ; T_1 – начальная температура газа, К .

$$Q_9 = G_a^1 C_a (T_2 - T_1), \quad (16)$$

где C_a – теплоемкость азота, $\text{ккал}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$; T_2 – температура азота на выходе из реактора, К ; T_1 – начальная температура азота, К .

$$Q_{10} = G_a^2 C_a (T_2 - T_1); \quad (17)$$

$$Q_{11} = G_{\text{вп}} C_{\text{кп}} (T_2 - T_1), \quad (18)$$

где $G_{\text{вп}}$ – скорость выгрузки песка, $\text{кг}/\text{ч}$; T_2 – температура выгруженного песка, К ; T_1 – температура внешней среды, К .

Термический КПД можно рассчитать как отношение полезно затраченной теплоты к общему объему тепла:

$$\text{КПД} = (Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_5) / Q_0. \quad (19)$$

Проанализировав [1, 2, 14–17], авторы предложили методику расчета критериев подобия для разработанного реактора с ЭТПС.

Критерий Нуссельта можно выразить следующим способом:

$$\text{Nu} = (20 d_k d) / ([n_r \lambda_r + n_a \lambda_a] / 100), \quad (20)$$

где Nu – число Нуссельта; d_k – диаметр канала (отверстие в газораспределительном колпачке), м ; d – эквивалентный размер частиц, м ; n_r, n_a – доля реакционного газа, азота в суммарном количестве объема газа, вводимого в реактор, %; λ_r, λ_a – коэффициент теплопроводности реакционного газа и азота, $\text{ккал}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{К})$.

Критерий Фурье можно выразить следующим уравнением:

$$\text{Fo} = (\chi \tau) / s^2, \quad (21)$$

где τ – коэффициент температуропроводимости среды, $\text{м}^2/\text{ч}$.

Критерием Био можно выразить теплообмен между нагретой и холодной частичками псевдооживленного слоя:

$$\text{Bi} = (\alpha_c s) / \lambda_c, \quad (22)$$

где α_c – коэффициент теплоотдачи частицы, $\text{ккал}/(\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{К})$; s – расстояние между частица-

ми, м; $\lambda_{\text{ч}}$ — коэффициент теплопроводности частицы, ккал/(м·ч·К).

Также при нагреве конвекцией критерием Bi можно определить, к какому виду термического тела относиться частицы псевдооживленного слоя. Если $Bi \leq 0,25$, то тело считается термически тонким, при $Bi \geq 0,5$ — массивным.

Критерий Старка (применяется аналогично критерию Bi при нагревании излучением) выражается следующим образом:

$$Sk = (\sigma_0 T^3 s) / \lambda_{\text{ч}}, \quad (23)$$

где σ_0 — постоянная Стефана-Больцмана, Вт·м⁻²·К⁻⁴; T — температура псевдооживленного слоя, К.

При нагреве частичек одновременно излучением и конвекцией область тонких тел определяют по выражению $Sk/0,15 + Bi/0,5 < 1,0$. При значениях $Bi > 0,5$; $Sk > 0,15$ и $Sk/0,15 + Bi/0,5 > 1,0$ тело считают массивным.

Псевдооживленный слой характеризуется очень высокой эффективностью теплообмена с поверхностью, расположенной в слое, или со стенками реактора. В случае с описанным реактором, в качестве поверхности мы обозначим электрод погруженный в слой. Учитывая, что тепло будет передаваться и от стенки, и от электрода, авторы предложили описать теплообмен между псевдооживленным слоем и электродом, принимая за основу уравнение Ньютона:

$$Q = \alpha_{\text{ст}} F_{\text{эл}} \Delta T, \quad (24)$$

где $\alpha_{\text{ст}}$ — коэффициент теплоотдачи стенки, ккал/(м²·ч·К); $F_{\text{эл}}$ — поверхность электрода, м².

$$\Delta T = T_{\text{ст}} - T_{\text{эл}}, \quad (25)$$

где $T_{\text{ст}}$ — температура стенки, К; $T_{\text{эл}}$ — температура электрода, К.

$$\alpha_{\text{ст}} = 35,7 \rho_{\text{ч}}^{0,2} (n_{\text{г}} \lambda_{\text{г}} + n_{\text{а}} \lambda_{\text{а}})^{0,6} d_{\text{ч}}^{-0,36}, \quad (26)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ — плотность частицы, кг/м³; $d_{\text{ч}}$ — диаметр частицы, м.

Для более глубокого понимания механизма теплообмена и теплового расчета необходимо знать влияние многих факторов на тепловые потоки. К ним относится характер движения частиц, погруженных в слой поверхностей, степень черноты отдельных частиц и слоя в целом, динамика изменения температуры газов, взаимодействие лучистой и кондуктивно-конвективной составляющих на результирующий теплообмен, влияние плазмы микророзряда.

Выводы

Разработанная конструкция реактора с электротермическим псевдооживленным слоем с комбинированным способом нагревания теоретически позволяет эффективно проводить процессы обработки диэлектрических материалов без использования дополнительного электропроводящего материала. Усовершенствованная методика расчета теплового баланса (для процесса нанесения пироуглеродного покрытия на кварцевый песок) позволяет оценить коэффициент полезного действия реактора и в дальнейшем сравнить его с другими способами нагревания электротермического псевдооживленного слоя. Подобрана методика расчета критериев подобия для возможности сравнения эффективности теплообмена в разработанном реакторе с другими аппаратами для термохимических процессов. На основе уравнения Ньютона предложено описание теплообмена между псевдооживленным слоем и электродом. В дальнейшем ожидаются экспериментальное подтверждение повышения эффективности процесса нанесения пироуглеродного покрытия на кварцевый песок и проверка адекватности методик расчета. Разработанные методики расчета теплофизических характеристик можно также применять к другим процессам в электротермическом псевдооживленном слое (предварительно учитывая технологические особенности процессов).

Список литературы

1. Gupta C.K. and Sathiyamoorthy D. Fluid Bed Technology in Materials Processing. New York : CRC Press LLC, 1999. 512 p.
2. Бородуля В.А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое. Минск : Наука и техника, 1973. 176 с.
3. Малиновский А.И., Рабинович О.С., Бородуля В.А., Гребеньков А.Ж., Сидорович А.М. Локальная проводимость кипящего слоя, состоящая из электропроводящих частиц. *Инж.-физ. журн.* 2012. Т. 85, № 2. С. 239–245.
4. Махорин К.Е., Карп И.Н., Кожан А.П. Высокотемпературная печь с электротермическим кипящим слоем для нагрева водорода. Информационное письмо Института газа АН УССР. Киев : Наук. думка, 1970. № 15. 32 с.
5. Pat. 4543240 A USA, B 01 J 12/00, Fluidized beds, silicon carbide production / William M. Goldberger. — Applicant and patent holder: Superior Graphite Co. № 06/691,076; applic. date: 14.01.1985; publ. date: 24.09.1985.
6. Бородуля В.А., Виноградов Л.М., Гребеньков А.Ж., Михайлов А.А., Рабинович О.С. Синтез мелкозернистого карбида кремния методом карботермического восстановления кремнезема в электротермическом кипящем слое. *Инж.-физ. журн.* 2012. Т. 85, № 2. С. 246–251.

- ротермическом кипящем слое. *IX Междунар. конф. «Кремний-2012» : Тезисы*. Санкт-Петербург, 2012. С. 280.
7. Gubynskiy M.V., Barsukov I. V., Fedorov S.S., Livitan M. V., Gogotsi O.G., Upendra S. Rohatgi Study of aerodynamic properties of continuous high temperature reactors. Conference ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting, Incline Village, NY, July 2013. 7 p.
 8. Богомолов В.А., Кожан А.П., Бондаренко Б.И., Ховавко А.И., Семейко К.В. Капсулирование кварцевого песка пироуглеродом в электротермическом псевдооживленном слое. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2013. № 5. С. 36–40.
 9. Simeyko K. Thermal influence of micro- discharge plasma on the process of receiving of quartz sand encapsulated by pyrocarbon. *Proceedings of the National Aviation University*. 2014. № 2. P.131–135.
 10. Латухина Н., Чепурнов В., Писаренко Г. Кремний и карбид кремния. *Новые технологии*. 2013. № 4. С. 104–110.
 11. Карбид кремния: технология, свойства, применения. Под общ. ред. А.Е.Беляева, Р.В. Конаковой. Харьков : ИСМА, 2010. 532 с.
 12. Семейко К.В. Использование электротермического псевдооживленного слоя в качестве внешнего нагревательного элемента реактора. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2015. № 1. С. 58–64.
 13. Пат. 117157 Укр., МПК В 01 J 8/18 (2006.01), В 01 J 8/42 (2006.01), В 01 J 19/14 (2006.01), С 01 В 33/021 (2006.01), С 01 В 33/021 (2006.01), С 30 В 25/10 (2006.01), С 30 В 28/14 (2006.01), С 30 В 31/12 (2006.01). Реактор для високотемпературних процесів у псевдозрідженому шарі. К.В.Семейко, Б.І.Бондаренко, О.П.Кожан, В.М. Дмитрієв; заявник і патентовласник: Інститут газу НАН України. № а201506499; заявл. 01.07.2015; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12.
 14. Махорин К.Е., Пикашов В.С., Кучин Г.П. Теплообмен в высокотемпературном кипящем слое. Киев : Наук. думка, 1981. 148 с.
 15. Давыдов В.И., Гамрекели М.Н., Добрыгин П.Г. Термические процессы и аппараты для получения окислов редких и радиоактивных металлов. М. : Атомиздат, 1977. 208 с.
 16. Махорин К.Е., Тищенко А.Т. Високотемпературные установки с кипящим слоем. Киев : Техника, 1966. 194 с.
 17. Баскаков А.П., Берг Б.В., Рыжков А.Ф., Филипповский Н.Ф. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое. М. : Металлургия, 1978. 248 с.

Поступила в редакцию 26.07.18

Сімейко К.В., канд. техн. наук, **Сидоренко Н.А.**, аспірант
Інститут газу НАН України, Київ
 вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: k_simeyko@ukr.net

Теплофізичні характеристики реактора з електротермічним псевдозрідженим шаром та комбінованим способом нагрівання

Для покращення технологічних особливостей та ефективності високотемпературної обробки діелектричних матеріалів розроблено конструкцію реактора з електротермічним псевдозрідженим шаром з комбінованим способом нагрівання. Основним призначенням даного реактора є процес нанесення піровуглецевого покриття на кварцовий пісок. Наведено принципово-технологічну схему процесу. Надалі кварцовий пісок, покритий піровуглецем, буде застосовуватися для одержання чистого карбиду кремнію. Розроблено методику розрахунку теплового балансу, яка дозволяє оцінити коефіцієнт корисної дії реактора. Підбрано методику розрахунку критеріїв подібності для можливості порівняння ефективності теплообміну в розробленому реакторі з іншими апаратами для термохімічних процесів. Запропоновано опис теплообміну між псевдозрідженим шаром та електродом. *Бібл. 17, рис. 2.*

Ключові слова: електротермічний псевдозріджений шар, піровуглець, карбід кремнію, тепловий баланс, критерії подібності.

Simeiko K.V., Candidate of Technical Sciences,
Sidorenko M.A., PhD Student

The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
 39, Degtjariivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: k_simeyko@ukr.net

Reactor's Thermophysical Characteristics with an Electrothermal Fluidized Bed and a Combined Heating Method

To improve the technological features and efficiency of high-temperature processing of the dielectric materials, a reactor design with the electrothermal fluidized bed with a combined heating method was developed at the Institute of Gas of the National Academy of Sciences of Ukraine. The main purpose of this reactor is the process of applying a pyrocarbon coating to quartz sand. The principle-technological scheme of the process is given. Subsequently, quartz sand coated with pyrolytic carbon will be used to produce pure silicon carbide. The authors developed a methodology for calculating the heat balance, which allows estimating the efficiency of the reactor. A method for calculating similarity criteria was chosen for the possibility of comparing the efficiency of heat exchange in a developed reactor with other machines for thermochemical processes. A description of the heat exchange between the fluidized bed and the electrode is proposed. After further experiments, it will be possible to make final conclusions regarding improving the technological features and increasing the efficiency of the process of applying a pyrolytic coating to quartz sand, and also to check the adequacy of the calculation methods. After further experiments, it will be possible to make final conclusions about improving the technological features and increasing the efficiency of the process of applying a pyrolytic coating to quartz sand. Also, it will allow to check the adequacy of the calculation methods. *Bibl. 17, Fig. 2.*

Key words: electrothermal fluidized bed, pyrocarbon, silicon carbide, heat balance, similarity criteria.

References

1. Gupta C. K. and Sathiyamoorthy D. Fluid Bed Technology in Materials Processing. New York: CRC Press LLC, 1999. 512 p. (Eng.)
2. Borodulya V.A. Vysokotemperaturnye processy v jelectrotermicheskom kipjashhem sloe [High-temperature processes in the electrothermal fluidized bed.]. Minsk: Nauka i tehnika [Science and Technology], 1973. 176 p. (Rus.)
3. Malinovskij A.I., Rabinovich O.S., Borodulja V.A., Greben'kov A.Zh., Sidorovich A.M. Lokal'naja provodimost' kipjashhego sloja, sostojashhaja iz jelectroprovodjashhich chastic [Local conductivity of the fluidized bed, consisting of electrically conductive particles]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal* [Engineering and Physics Journal], 2012, Vol. 85, № 2. P. 239–245. (Rus.)
4. Makhorin K.E., Karp I.M., Kozhan A.P. Vysokotemperaturnaja pech' s jelectrotermicheskim kipjashhem sloem dlja nagreva vodoroda [High-temperature furnace with electrothermal fluidized bed for hydrogen heating], *Informacionnoe pis'mo instituta gaza AN USSR* [Information Letter of Gas Institute of Academy of Sciences of Ukrainian Soviet Socialist Republic]. Kiev : Naukova Dumka, 1970, No. 15, 32 p. (Rus.)
5. Pat. 4543240 A USA, B 01 J 12/00, Fluidized beds, silicon carbide production. Patent holder: No. 06/691,076; applic. date: 14.01.1985; publ. date: 24.09.1985.
6. Borodulya V.A., Vinogradov L.M., Grebenkov A.G., Mikhailov A.A., Rabinovich O.S. Sintez melkozer-nistogo karbida kremnija metodom karbotermicheskogo vosstanovlenija kremne-zjoma v jelectrotermicheskom kipjashhem sloe [Synthesis of fine silicon carbide by car-bothermal reduction of silica in the electrothermal fluidized bed]. *Kniga tezisev, IX Mezhdunarodnaja konferencija «Kremnij-2012»* [IX International Conference «Silicon-2012». Book of abstracts.]. St.-Petersburg, 2012, 280 p. (Rus.)
7. Bogomolov V.O. Kozhan A.P., Bondarenko B.I., Khovavko O.I., Simeiko K.V. Kapsulirovanie kvarcevo-go peska pirougle-rodом v jelectrotermicheskom psevdoozhizhennom sloe [Research of the process of quartz sand encapsulation by pyrolytic carbon]. *Energotehnologii i Resursozberezenie [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2013, № 5. p. 36–40. (Rus.)
8. Gubynskiy M.V., Barsukov I. V., Fedorov S.S., Livitan M. V., Gogotsi O.G., Upendra S. Rohatgi Study of aerodynamic properties of continuous high temperature reactors. *Conference ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting, Incline Village, N.Y. July 2013*. 7 p.

9. Simeiko K. Thermal influence of microdischarge plasma on the process of receiving of quartz sand encapsulated by pyrocarbon. *Proceedings of the National Aviation University*. 2014, No. 2, pp. 131–135.
12. Simeiko K.V. Ispolzovanie elektrotermicheskogo psevdoozhizhenogo sloya v kachestve vneshnego narevatelnogo elementa reaktora [Efficiency of electrothermal fluidized bed applying as the outer heating element of reactor]. *Energotehnologii i Resursozberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2015, No. 1. pp. 58–64. (Rus.)
13. Pat. 117157 Ukraine, B 01 J 8/18 (2006.01), B 01 J 8/42 (2006.01), B 01 J 19/14 (2006.01), C 01 B 33/021(2006.01), C 01 B 33/021 (2006.01), C 30 B 25/10(2006.01), C 30 B 28/14 (2006.01), C 30 B 31/12 (2006.01). Reaktor dlja visokotemperaturnih procesiv u psevdoozhizhenomu shari [The reactor for high temperature processes in fluidized bed] / K.V. Simeiko, B.I. Bondarenko, O.P. Kozhan, V.M. Dmitriev; Applicant and patent holder: Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine. № a201506499; publ. date: 26.06.2017, Bull. No. 12. (Ukr.)
14. Mahorin K.E., Pikashov V.S., Kuchin G.P. Teplobmen v vysokotemperaturnom kipjashhem sloe. [Heat transfer in a high-temperature fluidized bed]. Kiev : Naukova Dumka, 1981. 148 p.
15. Davydov V.I., Gamrekeli M.N., Dobrygin P.G. Termicheskie processy i apparaty dlja poluchenija okislov redkih i radioaktivnyh metallov [Thermal processes and apparatus for the production of oxides of rare and radioactive metals]. Moscow : Atomizdat, 1977, 208 p.
16. Mahorin K.E., Tishhenko A.T. Vysokotemperaturnye ustanovki s kipjashhim sloem [High-temperature installations with fluidized bed]. Kiev. *Tehnika [Technique]*, 1966. 194 p.
17. Baskakov A.P., Berg B.V., Ryzhkov A.F., Filipovskij N.F. Processy teplo- i massoperenosa v kipjashhem sloe [Processes of heat and mass transfer in the fluidized bed]. Moscow: Metallurgija. 1978. 248 p.

Received July 26, 2018

УДК 681.536.6

Крыжановский К.С., канд. техн. наук

Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского, Киев
просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, e-mail: krizhanovskiy2011@yandex.ua

Система автоматического регулирования горения в газосжигающих установках по корректирующему параметру

В условиях непрерывной эксплуатации тепловых агрегатов, когда изо дня в день и от лета к зиме сильно колеблется температура воздуха на горение, его влажность, теплота сгорания газа и атмосферное давление, при вводе в эксплуатацию этих агрегатов приходится задавать такие настройки, чтобы при возникновении неблагоприятных внешних условий всегда было достаточно кислорода для полного сгорания газа. Это может быть достигнуто за счет повышения эффективности работы системы автоматического регулирования соотношения компонентов горения и температурных параметров агрегата по оптимальному режиму для каждого конкретного технологического процесса. Для достижения поставленной цели использованы результаты исследований химических процессов взаимодействия продуктов горения с помощью средств измерения электрических параметров пламени, основанных на физических методах ионизационного контроля процесса горения. Установленные особенности и полученные результаты позволили осуществить разработку устройства контроля ионизационных свойств процесса горения, качественную их зависимость и разработку на их основе системы автоматического регулирования горелок для промышленных тепловых агрегатов. *Библ. 7, рис. 3.*

Ключевые слова: оптимальный режим обжига, система автоматического регулирования, качество сжигания газообразного топлива, газовые горелки.