

Математические методы и информационные системы
в химической технологии

Mathematical methods and information systems
in chemical technology

УДК 661.665.1:66.096.5

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-2-163-173>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние утечки летучих продуктов синтеза на выход карбида кремния в реакторе электротермического кипящего слоя

В.С. Кузеванов¹, С.С. Закожурников², Г.С. Закожурникова³✉

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», филиал в г. Волжском, Волжский, Волгоградская область, 404110 Россия

² МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

³ Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, 400005 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: galya.vlz@mail.ru

Аннотация

Цели. Рассчитать влияние утечки летучих продуктов реакций карботермического синтеза карбида кремния на массовый выход конечного продукта и разработать общую модель синтеза мелкодисперсного карбида кремния в части конкретизации математической модели утечки летучих продуктов химических реакций из реакционного объема установки с ожижающим инертным газом.

Методы. В качестве способа получения SiC рассмотрен процесс его производства в электротермическом кипящем слое. Верификация модели утечки летучих продуктов проведена путем сравнения результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными по синтезу SiC в реакторе высокотемпературного кипящего слоя. Параметрами сравнения являлись массовый выход карбида кремния и суммарное время синтеза при последовательных вводах порций диоксида кремния в реакционный объем реактора.

Результаты. Конкретизировано значение параметра p общей модели синтеза SiC в кипящем слое — параметр p равен отношению числа углеродосодержащих частиц, участвующих в образовании SiO, к общему числу частиц диоксида кремния и характеризует состав устойчивых комплексов частиц шихты при разных рабочих температурах псевдоожиженного слоя. Показано, что отклонение расчетных и экспериментальных значений масс карбида кремния, получаемого в результате синтеза, не превышает 15.5% при высокой температуре кипящего слоя ($T = 1800^\circ\text{C}$) и уменьшается при снижении рабочей температуры: 4.7% при $T = 1450^\circ\text{C}$.

Выводы. Общая расчетная модель синтеза карбида кремния с встроенной процедурой расчета утечки летучих продуктов химических реакций позволяет проводить анализ вариантов производства SiC в реакторах электротермического кипящего слоя. Важным при этом является организация энергоэффективного рабочего цикла без предварительных дорогостоящих экспериментальных исследований.

Ключевые слова

синтез, карбид кремния, кипящий слой, шихта, летучие продукты реакций, модель, утечка SiO

Поступила: 12.01.2023

Доработана: 13.11.2023

Принята в печать: 07.03.2024

Для цитирования

Кузеванов В.С., Закожурников С.С., Закожурникова Г.С. Влияние утечки летучих продуктов синтеза на выход карбида кремния в реакторе электротермического кипящего слоя. *Тонкие химические технологии*. 2024;19(2):163–173. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-2-163-173>

RESEARCH ARTICLE

Effect of leakage of volatile synthesis products on silicon carbide yield in an electrothermal fluidized bed reactor

Vyacheslav S. Kuzevanov¹, Sergey S. Zakozhurnikov², Galina S. Zakozhurnikova³✉

¹ National Research University "MPEI", Volzhsky Branch, Volzhsky, Volgograd oblast, 404110 Russia

² MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

³ Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005 Russia

✉ Corresponding author; e-mail: galya.vlz@mail.ru

Abstract

Objectives. To calculate the effect of leakage of volatile synthesis products on silicon carbide yield in an electrothermal fluidized bed reactor, as well as to develop a general model of the synthesis of finely divided silicon carbide. This will be achieved by particularizing a mathematical model of leakage of volatile products of chemical reactions from the reaction volume of the reactor with the fluidizing inert gas.

Methods. As a method to produce silicon carbide, synthesis in an electrothermal fluidized bed was studied. The model of leakage of volatile products was validated by comparing the calculation results with existing experimental data on the SiC synthesis in a high-temperature fluidized bed reactor. The comparison parameters were: mass yield of silicon carbide, and the total synthesis time in a reactor with batch loading of silicon dioxide into the reaction volume.

Results. The value of the parameter p in the general model of SiC synthesis in a fluidized bed was established. The parameter p is equal to the ratio of the number of carbon-containing particles involved in the formation of SiO, to the total number of silicon dioxide particles. It also characterizes the composition of stable complexes of particles of the charge at various operating temperatures of the fluidized bed. The discrepancy between the calculated and experimental values of the masses of the synthesized silicon carbide was shown not to exceed 15.5% at a high temperature of the fluidized bed ($T = 1800^\circ\text{C}$) and decreases with a decrease in the operating temperature to 4.7% at $T = 1450^\circ\text{C}$.

Conclusions. The general computational model for silicon carbide synthesis with a built-in procedure for calculating the leakage of volatile products of chemical reactions enables the variants of SiC production in electrothermal fluidized bed reactors to be analyzed. In this case, it is important to establish an energy-efficient working cycle without preliminary expensive experimental studies.

Keywords

synthesis, silicon carbide, fluidized bed, charge, volatile reaction products, model, SiO leakage

Submitted: 12.01.2023

Revised: 13.11.2023

Accepted: 07.03.2024

For citation

Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S. Effect of leakage of volatile synthesis products on silicon carbide yield in an electrothermal fluidized bed reactor. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2024;19(2):163–173. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-2-163-173>

ВВЕДЕНИЕ

Анализ сложных высокотемпературных процессов в гетерогенных системах с химически реагирующими компонентами эффективен при сочетании экспериментальных и аналитических методов исследования [1–6]. В работах [7, 8] приведено опытно-теоретическое исследование формирования псевдооживленного слоя дисперсного материала для установления закономерностей и отношений между гидродинамическими процессами и электрической проводимостью слоя, была построена математическая модель прогнозирования структуры области

псевдооживленных частиц при наличии внутренних локальных источников теплоты. Однако в названных работах [7] и [8] исследуемая область не являлась реакционной, то есть трансформация компонентов не рассматривалась, как и выход какой-либо продукции.

В работах [9–11], посвященных исследованиям закономерностей образования карбида кремния в электротермическом кипящем слое (ЭТКС) [12], были проведены эксперименты по установлению параметров процесса, обеспечивающих необходимые свойства получаемого продукта. Теоретический

анализ физико-химических процессов при синтезе SiC в реакторе ЭТКС в этих работах не обозначен.

В работах [13–15] отражено развитие модели синтеза мелкодисперсного карбида кремния в псевдоожиженном высокотемпературном слое компонентов химических реакций. Этот реакционный объем состоит из стохастически перемещающихся твердых частиц, оживающего газа и летучих продуктов химических реакций. Вместе с оживающим нейтральным газом удаляются из реакционного объема и летучие продукты реакций, что, несомненно, влияет на эффективность работы установки.

В настоящей работе предложена модель процесса утечки SiO — важнейшего компонента реакции синтеза SiC, в значительной мере влияющего на выход карбида кремния.

Базовые положения модели синтеза

Рассмотрена конкретная установка — реактор ЭТКС с подводом электрической энергии, где реакционный объем организован как псевдоожиженный (кипящий) слой. Твердые компоненты реакционного объема (шихта) при загрузке в реактор представлены частицами углеродосодержащего материала (уголь или кокс, рексил) и частицами диоксида кремния (речной или кварцевый песок) [16].

Максимальная рабочая температура в кипящем слое составляла 1800°C; давление в рабочем объеме оставалось близким к атмосферному. Процесс синтеза SiC был организован в несколько стадий:

- загрузка углеродосодержащих частиц, их псевдоожижение и разогрев всего реакционного объема до рабочей температуры;
- периодическая загрузка частиц SiO₂ до полного истощения всего их количества, предусмотренного для организации синтеза SiC.

При реализации модели приняты следующие приближения и допущения:

- в реакционном объеме давление газов и их температура в процессе синтеза карбида кремния не изменяются;
- смесь газов в реакционном объеме является смесью идеальных газов;
- летучими продуктами синтеза являются только CO и SiO; смесь газов состоит из CO, SiO и оживающего газа (N₂);
- массовый расход оживающего газа не меняется в процессе синтеза;
- процесс синтеза представим в квазистационарном приближении.

Математическая модель утечки SiO

Как и в работах [13–15], нами был использован феноменологический подход и учитывались только две основные химические реакции синтеза карбида кремния:

для частиц c_2



и для частиц c_1



Здесь c_1 — карбидообразующие углеродосодержащие частицы; c_2 — углеродосодержащие частицы, вступающие в реакцию с SiO₂ в газообразной фазе.

Поскольку температура плавления и интенсивного испарения SiO₂ ниже температуры начала карбидообразования, частицы c_2 охлаждены и в реакции (2) не участвуют.

Количество газообразного продукта SiO для одного и того же реакционного объема в реакциях (1) и (2) отличается из-за утечки SiO. Определим массовую утечку SiO как

$$\frac{dm_{SiO}^{yt}}{d\tau} = V_{отв} M_{SiO} C_{SiO}, \quad (3)$$

где m — масса; τ — время; V — объемный расход; M — молярная масса; C — концентрация; индекс «SiO» относится к окиси кремния, индексы «yt» и «отв» к утечке и отводу смеси газов из реакционного объема соответственно. Тогда из (1) и (2) следует:

$$-\dot{m}_{c_2} = -\frac{1}{2} \dot{m}_{c_1} + V_{отв} M_c C_{SiO}, \quad (4)$$

где индексы « c », « c_1 » и « c_2 » относятся к углероду и углеродосодержащим частицам c_1 и c_2 соответственно; $\dot{m}_{c_1} = \frac{dm_{c_1}}{d\tau}$; $\dot{m}_{c_2} = \frac{dm_{c_2}}{d\tau}$.

Учтем, что для смеси идеальных газов

$$C_{N_2} + C_{CO} + C_{SiO} = \frac{P}{RT}. \quad (5)$$

Здесь P — давление смеси газов; T — температура смеси; R — универсальная газовая постоянная; индексы «N₂» и «CO» относятся к оживающему газу и окиси углерода соответственно.

Преобразуя уравнение молярного баланса на выходе смеси газов из реакционного объема $\dot{V}_{р.о.}$ и принимая во внимание уравнение связи концентраций летучих продуктов в этом объеме (5), получаем уравнение связи концентрации C_{SiO} и $V_{отв}$:

$$V_{отв} = \frac{\frac{1}{M_{N_2}} V_{вх} \rho_{вх} - \frac{1}{M_c} \left(\dot{m}_{c_2} + \frac{1}{2} \dot{m}_{c_1} \right)}{a_1 - C_{SiO}}, \quad (6)$$

где индекс «вх» относится к оживаемому газу на входе в реакционный объем; ρ — плотность; $a_1 = \frac{P}{RT}$.

Заметим, что уравнение (4) отражает влияние утечки SiO на динамику изменения масс частиц c_1 и c_2

в реакционном объеме, а следовательно, показывает и связь утечки SiO с выходом карбида кремния. Проинтегрировав уравнение (4), получаем следующий результат для периода Δt работы реактора при единичной загрузке SiO₂:

$$\Delta r_{c_2}^3 = \frac{1}{2} \frac{\tilde{n}_{c_1}}{\tilde{n}_{c_2}} \Delta r_{c_1}^3 + \left(\frac{1}{3} a_2 \right)^{-1} m_{\text{SiO}}, \quad (7)$$

$$\text{где } m_{\text{SiO}} = \int_{\Delta t} \left\{ \dot{m}_{\text{вх}} - \dot{m}_{c_2} - \frac{1}{2} \dot{m}_{c_1} \right\} \theta d\tau; \theta = \frac{C_{\text{SiO}}}{(a_1 - C_{\text{SiO}})};$$

$$\Delta r_{c_2}^3 = (r_{c_2}^{\Phi})^3 - (r_{c_2}^{\text{кр}})^3; \Delta r_{c_1}^3 = (r_{c_1}^{\Phi})^3 - (r_{c_1}^{\text{кр}})^3;$$

$$\dot{m}_{\text{вх}} = \frac{M_c}{M_{\text{N}_2}} V_{\text{вх}} \rho_{\text{вх}}; r — текущий радиус частицы;$$

индекс «ф» (фактический) относится к параметрам в момент загрузки порции SiO₂, индекс «кр» (критический) — к моменту загрузки последующей порции или окончанию процесса производства SiC; $a_2 = 4\pi r_c \tilde{n}_{c_2}$; $\tilde{n}$ — число частиц в реакционном объеме.

Основной трудностью в решении задачи о влиянии утечки SiO на выход карбида кремния является получение результата интегрирования правой части выражения для m_{SiO} (7). Воспользуемся модельным предложением по описанию изменения радиусов частиц c_1 и c_2 [14–15] в представлении составляющих $\dot{m}_{c_1}$ и $\dot{m}_{c_2}$ подынтегральной функции (7). В итоге имеем функцию, результатом интегрирования которой является произведение бета-функции и гипергеометрического ряда [17–18]. После преобразований получаем:

$$\begin{aligned} \Delta r_{c_2}^3 = & \frac{1}{2} \frac{\tilde{n}_{c_1}}{\tilde{n}_{c_2}} \Delta r_{c_1}^3 + a_1 \ln \frac{1}{1 - \beta^*} + \\ & + a_{\text{II}} \left\{ \left(r_{c_2}^{\text{кр}} \right)^2 S_1 + 2r_{c_2}^{\text{кр}} \Delta r_{c_2} S_2 + \left(\Delta r_{c_2} \right)^2 S_3 \right\} + \\ & + a_{\text{III}} \left\{ \left(r_{c_1}^{\text{кр}} \right)^2 S_4 + 2r_{c_1}^{\text{кр}} \Delta r_{c_1} S_5 + \left(\Delta r_{c_1} \right)^2 S_6 \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{Здесь } \beta^* = \frac{C_{\text{SiO}}^{\text{max}}}{a_1}; a_1 = \dot{m}_{\text{вх}} \frac{R_c^3}{m_{c_2}^0 L_{c_1}}; a_{\text{II}} = 3/\Delta r_{c_2} \beta^*;$$

$$a_{\text{III}} = \frac{3}{2} \frac{\tilde{n}_{c_1}}{\tilde{n}_{c_2}} \Delta r_{c_1} \beta^*; \Delta r_{c_1} = r_{c_1}^{\Phi} - r_{c_1}^{\text{кр}}; \Delta r_{c_2} = r_{c_2}^{\Phi} - r_{c_2}^{\text{кр}};$$

S_j ($j = 1, \dots, 6$) — гипергеометрические ряды, их общий вид:

$$S_j = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(\beta^*)^{i-1}}{k_j + i}, \quad (9)$$

$$\text{где } k_1 = l, k_2 = 2l, k_3 = 3l, k_4 = 1, k_5 = 2, k_6 = 3, l = \frac{L_{c_2}}{L_{c_1}}.$$

Индекс «0» в определении a_1 означает момент времени начала синтеза после прогрева реакционного объема до рабочей температуры процесса; R — начальный средний радиус загруженных в реактор частиц,

$$L_{c_1} = \psi_{c_1}^* \frac{C_{\text{SiO}}^{\text{max}}}{\Delta r_{c_1}}; L_{c_2} = \psi_{c_2}^* \frac{C_{\text{SiO}_2}^{\text{max}}}{\Delta r_{c_2}}. \text{ Функции } \psi_{c_1}^* \text{ и}$$

$\psi_{c_2}^*$ отражают соответственно скорости химических реакций (2) и (1) [19, 20]¹. Максимальная концентрация $C_{\text{SiO}_2}^{\text{max}}$ паров SiO₂ рассчитывается согласно данным работы [14]. Определение концентрации $C_{\text{SiO}}^{\text{max}}$ летучего продукта реакции синтеза SiC непосредственно после загрузки в реакционный объем очередной порции диоксида кремния требует уточнения, согласованного с математической моделью утечки SiO.

Определение максимального значения концентрации SiO в реакционном объеме

Обозначим $\dot{m}_{\text{SiO}}$ и $\dot{m}_{\text{CO}}$ как массовую генерацию SiO и CO в $\dot{V}_{\text{р.о.}}$ в момент «впрыска» порции SiO₂ ($\tau = 0$). Тогда из (1) и (2) следует

$$\frac{C_{\text{SiO}}^{\text{max}}}{C_{\text{CO}}^{\text{max}}} = \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\dot{m}_{c_1}}{\dot{m}_{c_2}} \right)^{-1} \Bigg|_{\tau=0}. \quad (10)$$

Уравнение (5) для $\tau = 0$ с учетом соотношения (10) будет выглядеть так:

$$a_1 = C_{\text{N}_2} \Big|_{\tau=0} + C_{\text{SiO}}^{\text{max}} \left(2 + \frac{1}{2} \frac{\dot{m}_{c_1}}{\dot{m}_{c_2}} \right) \Bigg|_{\tau=0}. \quad (11)$$

Устанавливающуюся концентрацию оживающего газа $C_{\text{N}_2} \Big|_{\tau=0}$ при вводе в реакционный объем порции частиц SiO₂ определяем через концентрацию $C_{\text{SiO}}^{\text{max}}$ по соотношению генерации молей летучих продуктов:

$$\frac{C_{\text{N}_2}}{C_{\text{SiO}}^{\text{max}}} \Bigg|_{\tau=0} = - \frac{\dot{m}_{\text{вх}}}{\dot{m}_{c_2}} \frac{M_c}{M_{\text{N}_2}}. \quad (12)$$

Массовые расходы $\dot{m}_{c_1}$ и $\dot{m}_{c_2}$ рассчитаем согласно общей модели синтеза карбида кремния [14–15].

¹ Feng N. *Kinetics of the reaction between quartz and silicon carbide in different gas atmospheres*: Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Trondheim. 2015. 90 p.

В итоге из уравнений (10)–(12) и соотношений для определений $\dot{m}_{c_1}$ и $\dot{m}_{c_2}$ получаем квадратное относительно искомого параметра C_{SiO}^{max} уравнение и решение:

$$C_{SiO}^{max} = \frac{\tilde{\rho}}{2} \left[\left(1 + \frac{4\tilde{q}}{\tilde{\rho}^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right], \quad (13)$$

$$\text{где } \tilde{\rho} = \frac{2b_2 + b_3}{b_1}; \quad \tilde{q} = a_1 \frac{b_2}{b_1}; \quad b_1 = M_{N_2} \sigma_{c_1},$$

$$b_2 = M_{N_2} \sigma_{c_2} C_{SiO_2}^{max}, \quad b_3 = \frac{1}{3} V_{вх} \rho_{вх} R_C^3 \rho_C;$$

$$\sigma_{c_1} = m_{c_1}^0 \left(r_{c_1}^\Phi \right)^2 \alpha_{c_1} k_{c_1}, \quad \sigma_{c_2} = m_{c_2}^0 \left(r_{c_2}^\Phi \right)^2 \alpha_{c_2} k_{c_2};$$

α — доля поверхности частицы, участвующая в химической реакции, k_{c_1} и k_{c_2} — константы химических реакций (2) и (1) соответственно.

Общая схема расчетов

Как и в работах [14–15], по общей модели синтеза карбида кремния рассчитывались все основные параметры процесса, определяющие изменение во времени характеристик шихты: размеры твердых частиц, концентрации летучих компонентов в реакционном объеме и выход конечного продукта синтеза. Однако в отличие от названных работ каждый вариантный расчет масс синтезированного карбида кремния m_{SiC} проводился для двух условий: с наличием утечки SiO в рабочем процессе и без такой утечки. Влияние утечки SiO определялось сравнением значений безразмерного параметра:

$$Y = \frac{m_{SiC}^{max} - m_{SiC}^p}{m_{SiC}^*}, \quad (14)$$

где индекс «*» относится к условию отсутствия утечки SiO в процессе синтеза; индексы «max» и «p» указывают на массовый выход продукта синтеза при минимальной утечке и различных значениях параметра p соответственно. При этом максимальный выход карбида кремния m_{SiC}^{max} всегда наблюдается при минимальном значении p , зависящем от физических свойств углеродосодержащих частиц и частиц SiO₂. Для рексила и речного песка, например, $p^{min} \simeq 0.2$.

Варьируемыми параметрами в расчетах являлись: масса $m_{ш}^0$ и состав исходной шихты, рабочая температура синтеза, количество δ загружаемых порций SiO₂ и относительное количество частиц c_2 , вступающих в реакцию (1), $p = \frac{\tilde{n}_{c_2}}{\tilde{n}_{SiO_2}}$. Поскольку

параметр p в рамках феноменологических подходов при моделировании процессов со множественным числом частиц определен быть не может, этот параметр определялся из сравнения интегральных показателей экспериментов [11] и расчетов. Таковыми показателями являлись массовый выход карбида кремния и время синтеза при идентичных исходных данных эксперимента и расчета.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Общие исходные данные

Все расчеты проводились для трех значений δ ($\delta = 2, 5$ и 10). При этом принято условие равномассовых порций вводимых в реакционный объем частиц SiO₂. В качестве углеродосодержащих частиц рассмотрен рексил, $\rho_C = 500$ кг/м³. Диоксид кремния как компонент исходной шихты — крупный речной песок. Раздельно рассмотрены процессы при рабочих температурах T в реакционном объеме, равных 1450, 1600 и 1800°C. Частицы компонента шихты в исходном состоянии во всех расчетах имели одинаковый средний размер: $R_C = 10.75 \cdot 10^{-5}$ м и $R_{SiO_2} = 6.5 \cdot 10^{-5}$ м. Массовый расход оживающего газа рассчитывался согласно [21].

Расчет при переменных значениях параметра p

Таблица 1 демонстрирует результаты расчетов выхода карбида кремния в процессах синтеза с учетом утечки SiO и в гипотетической ситуации, когда такой утечки нет и выход продукта максимален. Исходные массы твердых компонентов шихты: $m_c^0 = 0.32$ кг и $m_{SiO_2}^0 = 0.3$ кг. Рабочая температура процесса $T = 1600^\circ\text{C}$.

Аналогичные расчеты проведены для других рабочих температур синтеза карбида кремния: $T = 1450^\circ\text{C}$ и $T = 1800^\circ\text{C}$, результаты которых демонстрирует рис. 1. Из табл. 1 и рис. 1 видно, что для рассмотренных рабочих температур синтеза SiC рост параметра p сопровождается снижением выхода конечного продукта.

Объяснение этого эффекта достаточно простое. Увеличение параметра p означает образование устойчивых комплексов частиц $c_2 + \text{SiO}_2$ пониженной температуры с увеличивающимся числом частиц c_2 . При этом, в случае неизменного исходного числа углеродосодержащих частиц, количество карбидообразующих частиц c_1 уменьшается, толщина слоя карбида кремния, формирующегося на ядре c_1 , растёт с неизбежным увеличением диффузионного сопротивления и уменьшением скорости основной реакции (2). Процесс синтеза становится более длительным с увеличенной потерей SiO — важного летучего компонента химической реакции (2).

Таблица 1. Основные характеристики процесса синтеза SiC и размеры частиц остаточной шихты

Table 1. The main characteristics of the SiC synthesis process and the particle sizes of the residual charge

$m_{\text{SiC}}, \text{ кг}$ $m_{\text{SiC}}, \text{ kg}$	% выхода Mass yield, %	Время, с Time, s	$r_{c_1}^{\text{ВЫХ}} \cdot 10^5, \text{ м}$ $r_{c_1}^{\text{yield}} \cdot 10^5, \text{ m}$	δ	p	$m_{\text{SiC}}, \text{ кг}$ $m_{\text{SiC}}, \text{ kg}$	% выхода Mass yield, %	Время, с Time, s	$r_{c_1}^{\text{ВЫХ}} \cdot 10^5, \text{ м}$ $r_{c_1}^{\text{yield}} \cdot 10^5, \text{ m}$	$r_{c_2}^{\text{ВЫХ}} \cdot 10^5, \text{ м}$ $r_{c_2}^{\text{yield}} \cdot 10^5, \text{ m}$
С учетом утечки SiC With SiC leakage				—	—	Без учета утечки SiC Without SiC leakage				
0.108	35.724	10589	6.685	10	0.6	0.195	57.716	32127	5.708	9.413
0.114	37.381	9146	7.626	10	0.5	0.195	57.770	19876	7.216	9.095
0.119	38.713	8025	8.264	10	0.4	0.195	57.796	14733	7.980	8.572
0.124	39.958	7531	8.734	10	0.3	0.195	57.812	11962	8.460	7.523
0.132	42.222	7202	8.952	10	0.2	0.195	57.822	10574	8.795	2.595
0.124	40.152	9836	6.724	5	0.6	0.195	57.563	31079	5.779	9.413
0.130	41.602	8694	7.975	5	0.5	0.195	57.639	16792	7.244	9.095
0.136	43.109	7538	8.308	5	0.4	0.195	57.688	11746	7.995	8.572
0.142	44.703	6377	8.865	5	0.3	0.195	57.719	9446	8.470	7.523
0.147	46.005	5741	9.009	5	0.2	0.195	57.739	8187	8.802	2.595
0.141	44.637	7870	7.121	2	0.6	0.195	57.490	30146	5.883	9.413
0.142	44.816	6881	8.002	2	0.5	0.195	57.439	12467	7.297	9.095
0.144	45.295	5523	8.586	2	0.4	0.195	57.492	8461	8.026	8.572
0.148	46.315	4865	8.929	2	0.3	0.195	57.535	6745	8.491	7.523
0.163	50.036	4606	9.185	2	0.2	0.195	57.566	5618	8.817	2.595

Примечание: % выхода — $\left(\frac{m_{\text{SiC}}}{m_{\text{ш}}}\right) \cdot 100\%$; индекс «вых» относится к времени завершения синтеза.

Note: The yield (%) is calculated as $\left(\frac{m_{\text{SiC}}}{m_{\text{ch}}}\right) \cdot 100\%$; the subscript yield refers to the time at which the synthesis is completed.

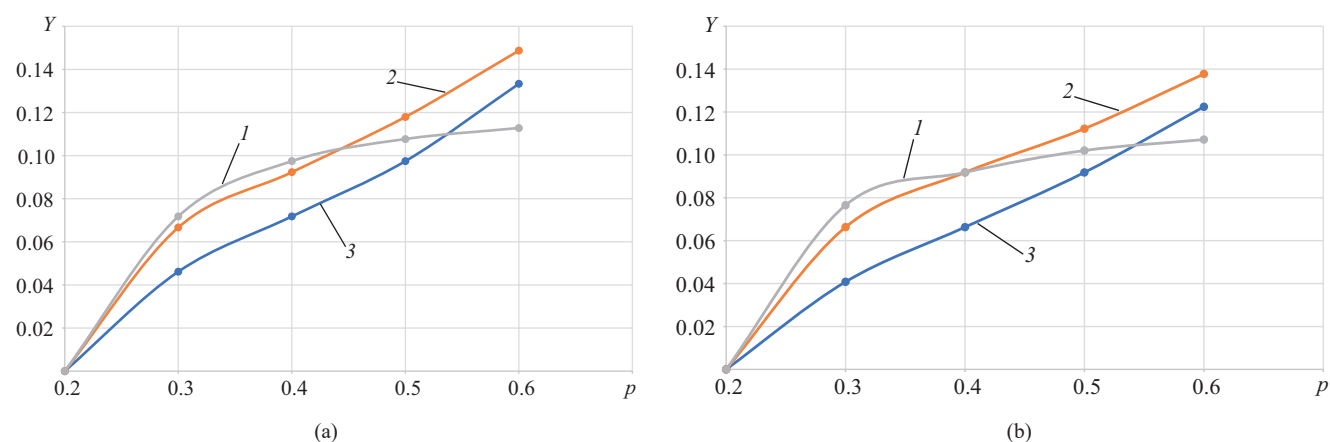


Рис. 1. Влияние утечки SiO на выход карбида кремния при рабочих температурах синтеза
(a) $T = 1450^\circ\text{C}$, (b) $T = 1800^\circ\text{C}$. Функция $Y = Y(p)$: (1) $\delta = 2$; (2) $\delta = 5$; (3) $\delta = 10$

Fig. 1. Effect of SiO leakage on silicon carbide yield at operating temperatures
of (a) 1450 and (b) 1800°C. Function $Y = Y(p)$: (1) $\delta = 2$; (2) $\delta = 5$; (3) $\delta = 10$

На рис. 2 показана связь утечки SiO со временем процесса синтеза в виде графиков функции $Y = Y(X)$, где X — относительное время дополнительной утечки SiO, соответствующее росту параметра p от его минимального значения,

$$X = \frac{\tau^p - \tau^{\max}}{\tau^*}. \quad (15)$$

В определении (15) времена τ^p , $\tau^{\max}$ и τ^* соответствуют синтезу с выходом конечного продукта m_{SiC}^p , $m_{\text{SiC}}^{\max}$ и m_{SiC}^* . Графики на рис. 2 отражают влияние количества вводов δ в реакционный объем равномассовых порций SiO₂ и рабочей температуры процесса на потерю компонента химических реакций синтеза карбида кремния.

Верификация результатов расчета

Переменные X (15) и Y (14), выступающие в роли аргумента и расчетной функции при построении графиков на рис. 2, удобны для анализа влияния утечки SiO на потерю конечного продукта при синтезе SiC. Это влияние в значительной мере зависит от времени синтеза, которое, в свою очередь, определено соотношением реагирующих частиц p в образующихся устойчивых комплексах $c_2 + \text{SiO}_2$ и количеством порционных вводов δ частиц SiO₂ в течение всего процесса.

Не в расчетном (виртуальном), но в реальном процессе производства карбида кремния параметр p принимает, согласно модельному представлению физико-химического процесса, вполне конкретное значение. Однако это значение не может быть зафиксировано в реакционном объеме непосредственно в эксперименте ввиду отсутствия работоспособных методик соответствующих измерений. В свою очередь, для заданного состава шихты, при известных константах химических реакций (1) и (2), конкретной рабочей температуре синтеза и количестве периодических порционных вводов диоксида кремния в реакционный объем параметр p и время синтеза конечного продукта связаны однозначно. Это можно видеть из сравнения рис. 1 и 2.

В экспериментах авторы работ [9–11] фиксировали в реакторе электротермического кипящего слоя в процессе высокотемпературного синтеза карбида кремния, в частности, изменения следующих параметров реакционной среды: рабочую температуру кипящего слоя, расход ожигающего газа, концентрацию CO (на выходе из реактора). По окончании каждого эксперимента измерялась масса остаточной шихты, а после отжига — масса полученного конечного продукта. Проводился также тщательный морфологический анализ. Данные работы [11] взяты за основу верификации результатов расчета в настоящем исследовании с одновременной конкретизацией модельного значения параметра p .

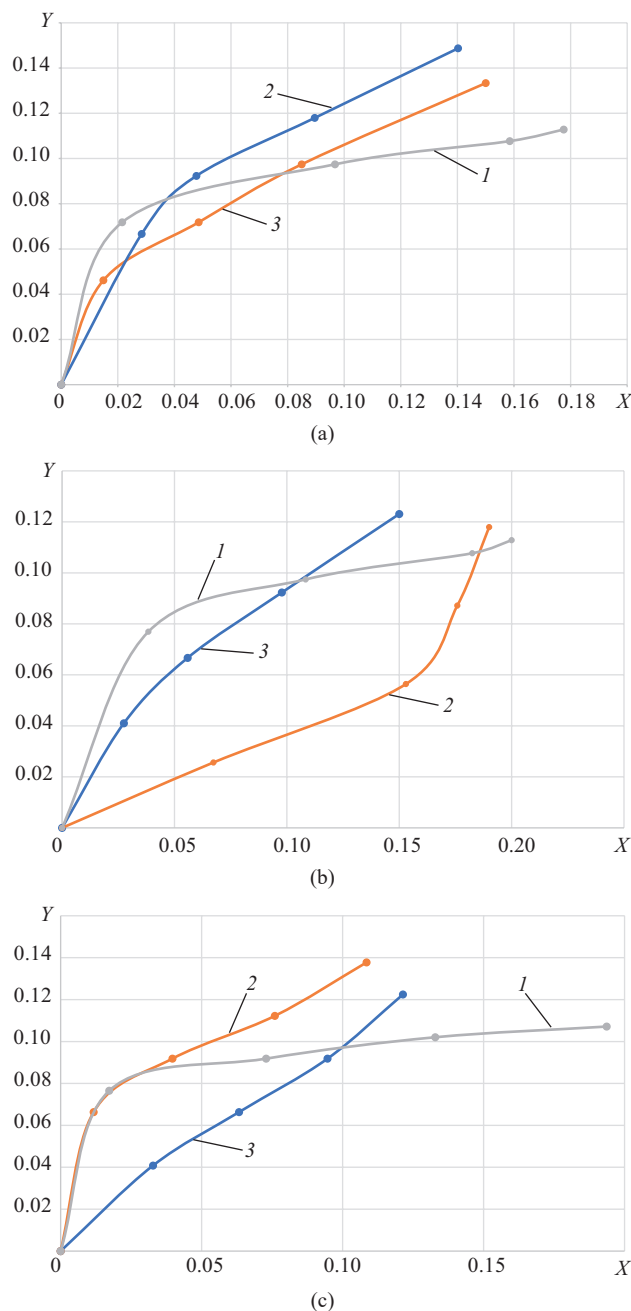


Рис. 2. Влияние времени синтеза на выход карбида кремния при рабочих температурах

(a) $T = 1450^\circ\text{C}$,

(b) $T = 1600^\circ\text{C}$,

(c) $T = 1800^\circ\text{C}$.

Функция $Y = Y(X)$:

(1) $\delta = 2$;

(2) $\delta = 5$;

(3) $\delta = 10$

Fig. 2. Effect of synthesis time on silicon carbide yield at operating temperatures of

(a) 1450,

(b) 1600, and

(c) 1800°C.

$Y_1 = Y_1(p)$:

(1) $\delta = 2$,

(2) $\delta = 5$,

(3) $\delta = 10$

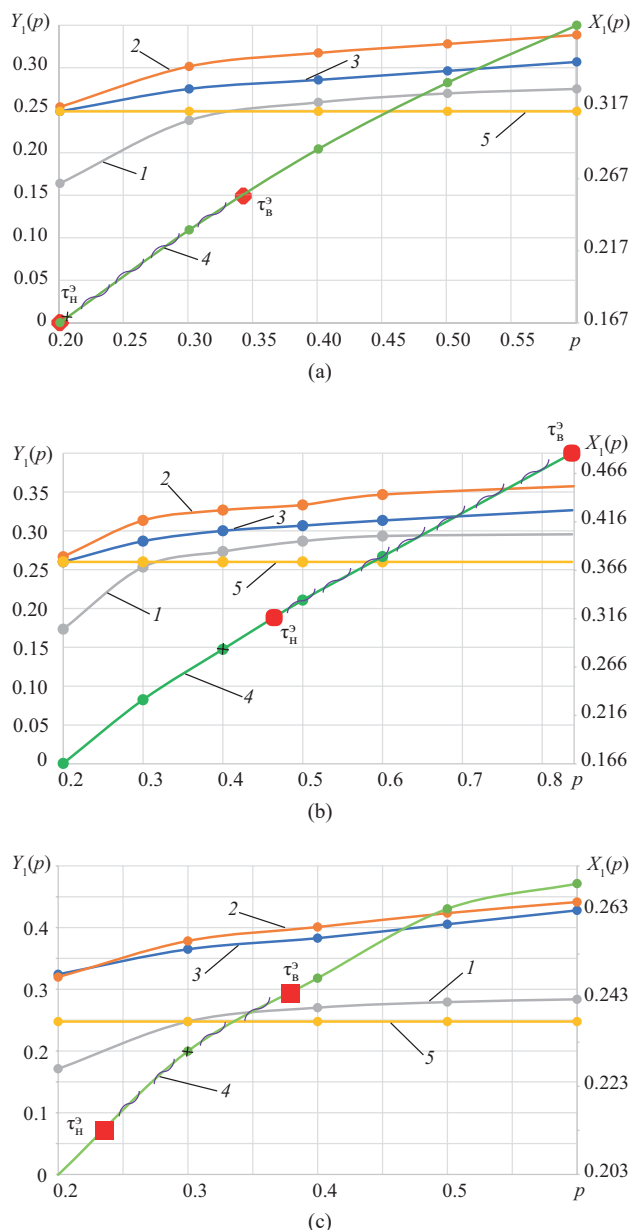


Рис. 3. Относительная потеря конечного продукта (SiC) вследствие утечки SiO

(a) $T = 1450^{\circ}\text{C}$, $m_c^0 = 0.570$ кг; $m_{\text{SiO}_2}^0 = 0.290$ кг;

(b) $T = 1600^{\circ}\text{C}$, $m_c^0 = 0.500$ кг; $m_{\text{SiO}_2}^0 = 0.230$ кг;

(c) $T = 1800^{\circ}\text{C}$, $m_c^0 = 0.400$ кг; $m_{\text{SiO}_2}^0 = 0.340$ кг;

— область экспериментальных значений времени синтеза;

+ расчетное время синтеза, $\delta = 10$.

Функция $Y_1 = Y_1(p)$: (1) $\delta = 2$; (2) $\delta = 5$; (3) $\delta = 10$;

(4) функция $X_1 = X_1(p)$ для $\delta = 10$; (5) эксперимент [11]

Fig. 3. Relative loss of end product (SiC) because of SiO leakage: (a) $T = 1450^{\circ}\text{C}$, $m_c^0 = 0.570$ kg, $m_{\text{SiO}_2}^0 = 0.290$ kg; (b) $T = 1600^{\circ}\text{C}$, $m_c^0 = 0.500$ kg, $m_{\text{SiO}_2}^0 = 0.230$ kg; (c) $T = 1800^{\circ}\text{C}$, $m_c^0 = 0.400$ kg, $m_{\text{SiO}_2}^0 = 0.340$ kg; (—) range of experimental value of synthesis time; (+) calculated synthesis time, $\delta = 10$. Function $Y_1 = Y_1(p)$: (1) $\delta = 2$; (2) $\delta = 5$; (3) $\delta = 10$; (4) function $X_1 = X_1(p)$ at $\delta = 10$; (5) experimental data [11].

На рис. 3 показано сравнение выхода SiC и времени синтеза, полученных в экспериментах и расчетах процессов с исходными параметрами, соответствующими экспериментам. Расчетные графики на рис. 3 построены в относительных координатах $Y_1 = Y_1(p)$ и $X_1 = X_1(p)$, где

$$\begin{cases} X_1 = \frac{\tau^* - \tau^p}{\tau^*} \\ Y_1 = \frac{m_{\text{SiC}}^* - m_{\text{SiC}}^p}{m_{\text{SiC}}^*} \end{cases} \quad (16)$$

Горизонтальные линии на рисунках соответствуют экспериментам и получены элементарной заменой τ^p и m_{SiC}^p на опытные (индекс «э») значения τ^3 и m_{SiC}^3 в определении (16).

Оценки времени синтеза в экспериментах производились по двум показателям:

- по периоду превышения рабочей температуры в реакционном объеме назначенного в конкретном эксперименте значения;
- по периоду фиксации CO как летучего продукта реакции (1) и (2) на выходе из реакционного объема.

Поскольку оценки не совпадают, на рис. 3 на графиках $X_1 = X_1(p)$ отмечены как верхнее τ_b^3 , так и нижнее τ_h^3 оценочные значения времени синтеза для каждого эксперимента. Сравнение экспериментальных данных производилось с результатами расчетов для $\delta = 10$. Последнее обусловлено количеством наблюдаемых на экспериментальных кривых [9–11] импульсных изменений значений рабочей температуры и концентрации CO.

Анализ соответствия результатов экспериментов и расчетов демонстрирует табл. 2.

В правом столбце табл. 2 указаны усредненные по времени синтеза значения параметра p , принятые для сравнения результатов экспериментов и расчетов. В итоге мы определяем показатель эффективности авторской модели с учетом утечки SiO в расчетах синтеза SiC при $\bar{p} = 0.2$ для $T = 1450^{\circ}\text{C}$, $\bar{p} = 0.4$ для $T = 1600^{\circ}\text{C}$ и $\bar{p} = 0.3$ для $T = 1800^{\circ}\text{C}$ как отклонение расчетных и экспериментальных значений масс карбида кремния,

$\left(1 - \frac{m_{\text{SiC}}^{\bar{p}}}{m_{\text{SiC}}^3}\right) \cdot 100\%$, получаемого в результате синтеза: 4.7% ($T = 1450^{\circ}\text{C}$); 5.4% ($T = 1600^{\circ}\text{C}$); 15.5% ($T = 1800^{\circ}\text{C}$). Отметим при этом, что модель утечки дает результат потери SiC несколько выше, чем наблюдается в экспериментах. Количественно это демонстрирует показатель $\left(1 - \frac{m_{\text{SiC}}^{\bar{p}}}{m_{\text{SiC}}^*}\right) \cdot 100\%$, равный 3.6% ($T = 1450^{\circ}\text{C}$); 3.9% ($T = 1600^{\circ}\text{C}$); 11.5% ($T = 1800^{\circ}\text{C}$).

Таблица 2. Расчетные и экспериментальные параметры синтеза SiC

Table 2. Calculated and experimental parameters of SiC synthesis

$T, ^\circ\text{C}$	$m_{\text{ш}}, \text{ кг}$ $m_{\text{ch}}, \text{ kg}$	$m_{\text{ш}}^{\text{э}}, \text{ кг}$ $m_{\text{ch}}^{\text{exp}}, \text{ kg}$	$m_{\text{SiC}}^{\bar{\text{p}}}, \text{ кг}$ $m_{\text{SiC}}^{\bar{\text{p}}}, \text{ kg}$	$m_{\text{SiC}}^{\text{э}}, \text{ кг}$ $m_{\text{SiC}}^{\text{exp}}, \text{ kg}$	$\tau_{\text{н}}^{\text{э}} \cdot 10^{-4}, \text{ с}$ $\tau_{\text{low}}^{\text{exp}} \cdot 10^{-4}, \text{ s}$	$\tau_{\text{в}}^{\text{э}} \cdot 10^{-4}, \text{ с}$ $\tau_{\text{up}}^{\text{exp}} \cdot 10^{-4}, \text{ s}$	$\tau^{\bar{\text{p}}} \cdot 10^{-4}, \text{ с}$ $\tau^{\bar{\text{p}}} \cdot 10^{-4}, \text{ s}$	$\bar{p}$
1450	0.589	0.565*	0.142	0.149*	1.00	1.20	1.13	0.2
1600	0.522	0.509*	0.105	0.111*	1.23	1.38	1.20	0.4
1800	0.382	0.418*	0.141	0.167*	1.25	1.40	1.31	0.3

*Без учета примесей [22] в шихте.

*Impurities in the charge are ignored [22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс образования SiC при переменных параметрах химически реагирующих сред в высокотемпературном оживленном (кипящем) слое весьма сложен. Выход конечного продукта не определен волюметрическим балансом взаимодействующих элементов замкнутой системы и существенно зависит от потери из реакционного объема любого реагирующего компонента. В настоящей работе продемонстрирована работоспособность впервые созданной модели и расчетного алгоритма утечки летучего продукта синтеза карбида кремния.

Утечка SiO промежуточного летучего продукта синтеза карбида кремния из реакционного объема реактора ЭТКС приводит в итоге к потере конечного продукта — SiC. Однако сокращение количества SiO как реагента сопровождается уменьшением времени синтеза карбида кремния, то есть снижением энергетических затрат на производство единицы продукции.

Наличие расчетной модели синтеза карбида кремния с верифицированной процедурой расчета утечки летучих продуктов химических реакций, представленной в настоящей работе в форме модели утечки SiO, позволит проводить расчетные исследования по оптимизации процесса производства SiC в реакторах ЭТКС, что, в свою очередь, определит обоснованность рекомендаций по составу исходной шихты, количеству последовательных вводов

SiO₂ в реакционный объем, рабочей температуре производственного процесса. При этом наиболее важным является организация энергоэффективного рабочего цикла без предварительных дорогостоящих экспериментальных исследований.

Вклад авторов

В.С. Кузеванов — разработка концепции и методологии исследования, написание текста статьи.

С.С. Закожурников — разработка программного обеспечения и проверка правильности.

Г.С. Закожурникова — проведение расчетов, анализ источников литературы, поиск и анализ экспериментальных данных.

Все авторы одобрили окончательную версию статьи.

Authors' contributions

V.S. Kuzevanov — developing the research concept and methodology and writing the text of the manuscript.

S.S. Zakozhurnikov — software and validation.

G.S. Zakozhurnikova — carrying out calculations, analyzing literature sources, and searching and analyzing experimental data.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильева Е.В., Черкасова Т.Г., Неведров А.В., Папин А.В., Субботин С.П. Возможность модернизации коксохимического производства с применением компьютерной программы прогнозирования выхода химических продуктов коксования. *Химия и химическая технология: достижения и перспективы: сборник материалов V Всероссийской конференции*. 2020. С. 83.1–83.3.
2. Ryabov G.A., Folomeev O.M. Problems of Hydrodynamics and Heat Transfer in Interconnected Bed Reactors for CO₂ Capture and Obtaining Hydrogen. *Therm. Eng.* 2023;70(4):311–322. <https://doi.org/10.1134/S0040601523040055>
3. Prado D.S., Vilarrasa-García E., Samprónha E., et al. Multiple approaches for large-scale CO₂ capture by adsorption with 13X zeolite in multi-stage fluidized beds assessment. *Adsorption*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10450-023-00422-x>
4. Sun L., Yin F., Cao J., et al. Numerical Study on the Process of Chemical Looping Hydrogen Production with Multiple Circulating Fluidized Bed Reactors. *J. Therm. Sci.* 2023;32(5): 1945–1954. <https://doi.org/10.1007/s11630-023-1872-1>
5. Ryabov G.A. A Review of the Research Results into the Technologies of Solid-Fuel Combustion in a Circulating Fluidized Bed Conducted Abroad and in Russia. *Therm. Eng.* 2021;68(2): 117–135. <https://doi.org/10.1134/S0040601521020051>
6. Semeiko K.V., Kustovskyi S.S., Kupriyanchuk S.V., et al. Dependence of the Pyrocarbon Structure on the Parameters of the Process of Pyrolysis of Hydrocarbon Gases in an Electrothermal Fluidized Bed. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2020;93(3):677–684. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02166-9>
7. Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Василевич С.В., Малько М.В. Опытнo-теоретическое исследование гидромеханических процессов в электротермическом кипящем слое. *Международный Косыгинский форум. МНТС Плановский-2021*. 2021. Т. 1. С. 54–57.
8. Митрофанов А.В., Василевич С.В., Малько М.В., Овчинников Л.Н., Шпейнова Н.С. Разработка математической модели псевдооживления частиц при наличии внутренних источников теплоты. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)*. 2022;6:49–57.
9. Бородуля В.А., Виноградов Л.М., Гребеньков А.Ж., Михайлов А.А., Сидорович А.М. Карбидотермическое восстановление SiO₂ и образование карбида кремния в электротермическом кипящем слое. В сб. трудов: *Тепло- и массоперенос-2012*. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси; 2013. С. 121–127.
10. Бородуля В.А., Виноградов Л.М., Гребеньков А.Ж., Михайлов А.А. Синтез карбида кремния в электротермическом реакторе с кипящим слоем углеродных частиц. *Горение и плазмохимия*. 2015;13(2):92–102.
11. Бородуля В.А., Гребеньков А.Ж., Михайлов А.А. Особенности образования различных структурных модификаций карбида кремния при его карботермическом синтезе в реакторе электротермического кипящего слоя. В сб. трудов: *Тепло- и массоперенос – 2018*. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси; 2019. С. 107–114.
12. Бородуля В.А., Виноградов Л.М., Гребеньков А.Ж., Михайлов А.А. *Способ и установка для получения карбида кремния*: Евразийский патент 027539. Заявка № 201500555; заявл. 07.05.2015, опублик. 31.08.2017.
13. Kuzevanov V.S., Garyaev A.B., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S. Model of continuous production of fine silicon carbide. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019;537(3):032106. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032106>

REFERENCES

1. Vasil'eva E.V., Cherkasova T.G., Nevédrov A.V., Papin A.V., Subbotin S.P. The possibility of modernizing coke chemical production using a computer program for predicting the yield of chemical coking products. In: *Chemistry and Chemical Technology: Achievements and Prospects: Proceedings of the Fifth All-Russian Conference*. 2020. P. 83.1–83.3 (in Russ.).
2. Ryabov G.A., Folomeev O.M. Problems of Hydrodynamics and Heat Transfer in Interconnected Bed Reactors for CO₂ Capture and Obtaining Hydrogen. *Therm. Eng.* 2023;70(4):311–322. <https://doi.org/10.1134/S0040601523040055>
3. Prado D.S., Vilarrasa-García E., Samprónha E., et al. Multiple approaches for large-scale CO₂ capture by adsorption with 13X zeolite in multi-stage fluidized beds assessment. *Adsorption*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10450-023-00422-x>
4. Sun L., Yin F., Cao J., et al. Numerical Study on the Process of Chemical Looping Hydrogen Production with Multiple Circulating Fluidized Bed Reactors. *J. Therm. Sci.* 2023;32(5):1945–1954. <https://doi.org/10.1007/s11630-023-1872-1>
5. Ryabov G.A. A Review of the Research Results into the Technologies of Solid-Fuel Combustion in a Circulating Fluidized Bed Conducted Abroad and in Russia. *Therm. Eng.* 2021;68(2): 117–135. <https://doi.org/10.1134/S0040601521020051>
6. Semeiko K.V., Kustovskyi S.S., Kupriyanchuk S.V., et al. Dependence of the Pyrocarbon Structure on the Parameters of the Process of Pyrolysis of Hydrocarbon Gases in an Electrothermal Fluidized Bed. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2020;93(3):677–684. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02166-9>
7. Mitrofanov A.V., Mizonov V.E., Vasilevich S.V., Mal'ko M.V. Experimental-calculated study of hydro-mechanical processes within electrothermal fluidized bed. *Kosygin International Forum. MNTS Planovsky-2021*. 2021. V. 1. P. 54–57 (in Russ.).
8. Mitrofanov A.V., Vasilevich S.V., Mal'ko M.V., Ovchinnikov L.N., Shpeynova N.S. Development of a mathematical model of fluidization of particles in presence of internal heat sources. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU) = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University (Vestnik IGEU)*. 2022;6:49–57 (in Russ.).
9. Borodulya V.A., Vinogradov L.M., Greben'kov A.Zh., Mikhailov A.A., Sidorovich A.M. Carbide-thermal reduction of SiO₂ and formation of silicon carbide in an electrothermal fluidized bed. In: *Teplo- i Massoperenos – 2012*. Minsk: A.V. Lykov ITMO, NAS of Belarus; 2013. P. 121–127 (in Russ.).
10. Borodulya V.A., Vinogradov L.M., Greben'kov A.Zh., Mikhailov A.A. Synthesis of silicon carbide in electrothermal reactor with fluidized bed of carbon particles. *Gorenje i Plazmokhimiya*. 2015;13(2):92–102 (in Russ.).
11. Borodulya V.A., Greben'kov A.Zh., Mikhailov A.A. Features of the formation of various structural modifications of silicon carbide during its carbothermal synthesis in an electrothermal fluidized bed reactor. In: *Teplo- i Massoperenos – 2018*. Minsk: A.V. Lykov ITMO, NAS of Belarus; 2019. P. 107–114 (in Russ.).
12. Borodulya V.A., Vinogradov L.M., Greben'kov A.Zh., Mikhailov A.A. *Method and plant for obtaining silicon carbide*. Eur. Pat. 27539. Publ. 31.08.2017 (in Russ.).
13. Kuzevanov V.S., Garyaev A.B., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S. Model of continuous production of fine silicon carbide. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019;537(3): 032106. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032106>
14. Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S., Garyaev A.B. Finely dispersed silicon carbide synthesis model in the electrothermal reactor with periodic batch loading. *J. Phys.: Conf. Ser.: Hydrodynamics and Heat and Mass Transfer*. 2020;1683: 022054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022054>

14. Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S., Garyaev A.B. Finely dispersed silicon carbide synthesis model in the electrothermal reactor with periodic batch loading. *J. Phys.: Conf. Ser.: Hydrodynamics and Heat and Mass Transfer*. 2020;1683:022054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022054>
15. Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S. Model and results of a study of the synthesis of finely dispersed silicon carbide in an electro-thermal reactor. *Solid State Phenomena*. 2021;316:147–152. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.147>
16. Семейко К.В., Малиновский А.И., Гребеньков А.Ж., Саенко С.Ю., Лобач К.В. Кустовская А.Д., Ляпощенко А.А., Склабинский В.И. Разработки технологий получения карбида кремния (обзор). *Вестник НЯЦ РК*. 2021;2:30–41. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-30-41>
17. *Higher Transcendental Function*: in 3 v. V. I. McGraw – Hill Book Company. Inc.; 1953. 395 p.
18. Фиктенгольд Г.М. *Курс дифференциального и интегрального исчисления*: в 3-х т. М.–Л.: Гостехиздат; 1948. Т. 2. 793 с.
19. Барабанов Н.Н., Земскова В.Т., Митрофанов А.Д., Ермолаева Е.В. Математическое моделирование процесса карбидизации синтактных пенопластов. *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 1998;41(5):32–34.
20. Li X., Zhang G., Tronstad R., Ostrovski O. Reduction of quartz to silicon monoxide by methane-hydrogen mixtures. *Metall. Mater. Trans. B: Process Metall. Mater. Processing Sci.* 2016;47(4):2197–2204. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0670-5>
21. Уоллис Г. *Одномерные двухфазные течения*: пер. с англ. М.: Мир; 1972. 440 с.
22. Агеев О.А. *Карбид кремния: технология, свойства, применение*. Харьков: ИСМА; 2010. 531 с. ISBN 978-966-02-5445-9
15. Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S. Model and results of a study of the synthesis of finely dispersed silicon carbide in an electro-thermal reactor. *Solid State Phenomena*. 2021;316:147–152. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.147>
16. Simeiko K.V., Malinowski A.I., Grebenkov A.Zh., Sayenko S.Yu., Lobach K.V., Kustovskaya A.D., Liaposhchenko O.O., Sklabinskiy V.I. Development of technologies of silicon carbide producing (Review). *Vestnik NYaTs RK = NNC RK Bulletin*. 2021;2:30–41 (in Russ.). <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-30-41>
17. *Higher Transcendental Function*: in 3 v. V. I. McGraw – Hill Book Company. Inc.; 1953. 395 p.
18. Fikhtengolts G.M. *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya (Course of Differential and Integral Calculus)*: in 3 v. Moscow–Leningrad: Gostekhizdat; 1948. V. 2. 793 p. (in Russ.).
19. Barabanov N.N., Zemskova V.T., Mitrofanov A.D., Ermolaeva E.V. Mathematical modeling of the process of carbidization of syntactic foams. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. = ChemChemTech*. 1998;41(5): 32–34 (in Russ.).
20. Li X., Zhang G., Tronstad R., Ostrovski O. Reduction of quartz to silicon monoxide by methane-hydrogen mixtures. *Metall. Mater. Trans. B: Process Metall. Mater. Processing Sci.* 2016;47(4):2197–2204. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0670-5>
21. Wallis G. *Odnomernye dvukhfaznye techeniya (One-Dimensional Two-Phase Flows)*: transl. from Engl. Moscow: Mir; 1972. 440 p. (in Russ.). [Wallis G. *One-Dimensional Two-Phase Flows*. NY: McGraw-Hill; 1969. 408 p.]
22. Ageev O.A. *Karbid kremniya: tekhnologiya, svoystva, primeneniye (Silicon Carbide: Technology, Properties, Applications)*. Kharkov: ISMA; 2010. 531 p. (in Russ.). ISBN 978-966-02-5445-9

Об авторах

Кузеванов Вячеслав Семенович, д.т.н., профессор, кафедра энергетики, Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Волжском (404110, Волгоградская область, г. Волжский, пр-т Ленина, д. 69). E-mail: vyacheslavkuzevanov@gmail.com. Scopus Author ID 57204855036, SPIN-код РИНЦ 7835-6260.

Закожурников Сергей Сергеевич, к.т.н., доцент, кафедра высшей математики-3, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: jester.vlz@mail.ru. Scopus Author ID 57198768825, ResearcherID ABG-4696-2020, SPIN-код РИНЦ 1864-0437, <https://orcid.org/0000-0003-2354-9656>

Закожурникова Галина Сергеевна, к.т.н., доцент, кафедра теплотехники и гидравлики, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (400005, Россия, Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, д. 28). E-mail: galya.vlz@mail.ru. Scopus Author ID 57198782591, ResearcherID HHY-8485-2022, SPIN-код РИНЦ 7209-9481, <https://orcid.org/0000-0002-4870-0749>

About the authors

Vyacheslav S. Kuzevanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Energy, National Research University MPEI, Volzhsky Branch, (69, Lenina pr., Volzhsky, Volgograd oblast, 404110, Russia). E-mail: vyacheslavkuzevanov@gmail.com. Scopus Author ID 57204855036, RSCI SPIN-code 7835-6260.

Sergey S. Zakozhurnikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Higher Mathematics-3, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: jester.vlz@mail.ru. Scopus Author ID 57198768825, ResearcherID ABG-4696-2020, RSCI SPIN-code 1864-0437, <https://orcid.org/0000-0003-2354-9656>

Galina S. Zakozhurnikova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Heat Engineering and Hydraulics, Volgograd State Technical University, (28, Lenina pr., Volgograd, 400005, Russia). E-mail: galya.vlz@mail.ru. Scopus Author ID 57198782591, ResearcherID HHY-8485-2022, RSCI SPIN-code 7209-9481, <https://orcid.org/0000-0002-4870-0749>