

===== АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ =====
И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 685.51

DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-2-11-25

EDN: RLVRHW

Научная статья

**Совершенствование математической модели получения
мелкодисперсного материала для создания
автоматизированной системы управления процессом производства**

**С. С. Закожурников¹, Г. С. Закожурникова²,
Т. А. Горшунова¹, О. А. Пихтилькова¹, Е. В. Пронина¹**

¹МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78

²Волгоградский государственный технический университет
400005, Россия, г. Волгоград, пр-т Ленина, 28

Аннотация. Основные требования, предъявляемые к крупным промышленным предприятиям, заключаются в повышении энергетической эффективности технологических процессов и повышении экологичности производства. Одним из возможных решений этих проблем являются моделирование основных процессов, протекающих в установках, и создание автоматизированной системы управления на основе математических моделей. Рассмотрен промышленный процесс производства карбида кремния. Повышение эффективности данного процесса происходит за счет создания более совершенных режимов работы печей сопротивления на основе полученной в ходе математического моделирования информации о процессах, оказывающих наибольшее влияние на плавку. На основе математической модели можно построить автоматизированную систему управления процессом производства, которая на основе данных о температуре в различных точках печи сопротивления будет поддерживать наиболее эффективные режимы плавки карбида кремния. В математической модели учтены основные процессы, протекающие в печи сопротивления в течение плавки, а именно: химические реакции, фильтрация газовой компоненты, сушка материала, энерговыделение, происходящее на нагреватель печи сопротивления. Усовершенствована математическая модель технологического процесса производства карбида кремния за счет учета влияния на распределение температуры теплоты химических реакций. Предложены теоретические основы построения автоматизированной системы управления процессом производства на основе данных о температуре в различных точках печи. В работе изложено современное состояние промышленного производства карбида кремния. Рассмотрена математическая модель процессов теплообмена в высокотемпературной печи сопротивления на примере технологического процесса производства SiC. Работоспособность разработанной математической модели проверена путем сопоставления проведенных экспериментов и численных расчетов. Применение автоматизированной системы управления на основе усовершенствованной математической модели возможно на промышленных предприятиях, занимающихся производством мелкодисперсных материалов, например, карбида кремния. Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением экспериментальных данных и данных, полученных с помощью математического моделирования, в наиболее важных точках (у поверхности зерна и у периферии) без учета этапов нагрева и остывания печи сопротивления. Расхождение данных в точке, близкой к сердцу, составило максимум 15 %, в точке на периферии – 5 %, что является удовлетворительным результатом.

Ключевые слова: карбид кремния, математическая модель, система управления

Поступила 10.03.2024, одобрена после рецензирования 18.03.2024, принята к публикации 29.03.2024

Для цитирования. Закожурников С. С., Закожурникова Г. С., Горшунова Т. А., Пихтилькова О. А., Пронина Е. В. Совершенствование математической модели получения мелкодисперсного материала для создания автоматизированной системы управления процессом производства // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 2. С. 11–25. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-2-11-25

MSC: 93-10

Original article

Improvement of the mathematical model for obtaining finely dispersed material to create an automated production process control system

S.S. Zakozhurnikov¹, G.S. Zakozhurnikova²,
T.A. Gorshunova¹, O.A. Pikhtilkova¹, E.V. Pronina¹

¹MIREA – Russian Technological University
119454, Russia, Moscow, 78 Vernadsky avenue

²Volgograd State Technical University
400005, Russia, Volgograd, 28 Lenin avenue

Abstract. The main requirements for large industrial enterprises are to increase the energy efficiency of technological processes and improve the environmental friendliness of production. One of the possible solutions to these problems is modeling the main processes occurring in installations and creating an automated control system based on mathematical models. The industrial process for the silicon carbide production is considered. Increase of the process efficiency occurs due to the creation of more advanced operating modes of resistance furnaces based on information obtained during mathematical modeling about the processes that have the greatest impact on melting. Based on the mathematical model, it is possible to build an automated melting process control system, which, based on temperature data at various points in the resistance furnace, will support the most effective silicon carbide melting modes. The mathematical model takes into account the main processes occurring in a resistance furnace during melting, namely: chemical reactions, gas component filtration, the material drying, and energy release attributable to the resistance furnace heater. The technological process mathematical model for the silicon carbide production has been improved. Theoretical foundations for constructing an automated production process control system based on temperature data at the furnace various points were proposed. The current state of the issue of industrial silicon carbide production is presented in the paper. The mathematical model of heat and mass transfer processes in a high-temperature resistance furnace is considered using the example of the technological process of silicon carbide production SiC. The performance of the developed mathematical model was verified by comparing the experiments performed and numerical calculations. The use of an automated control system based on an improved mathematical model is possible at industrial enterprises engaged in the production of fine materials, for example, silicon carbide. The reliability of the results obtained is confirmed by a comparison of experimental data and data obtained using mathematical modeling at the most important points (at the core surface and at the periphery) without taking into account the heating and cooling stages of the resistance furnace. The discrepancy between the data at a point close to the core was a maximum of 15%, and at a point on the periphery – 5%, which is a satisfactory result.

Keywords: silicon carbide, mathematical model, control system

Submitted 10.03.2024, approved after reviewing 18.03.2024, accepted for publication 29.03.2024

For citation. Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S., Gorshunova T.A., Pikhtilkova O.A., Pronina E.V. Improvement of the mathematical model for obtaining finely dispersed material to create an automated production process control system. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2024. Vol. 26. No. 2. Pp. 11–25. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-2-11-25

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию промышленного производства карбида кремния посвящен ряд работ. Авторы работы [1] разработали математическую модель образования SiC, которая учитывает много различных факторов влияния. Проведен глубокий анализ физико-химических процессов при получении карбида кремния, определены мероприятия по уменьшению затрат электрической энергии, потребляемой при производстве. Далее полученная математическая модель совершенствовалась путем учета дополнительных факторов, влияющих на распределение температурного поля в печи. В статье [2] разработана модель осадки мелкодисперсного материала в процессе образования карбида кремния. В статье [3] исследовано влияние переноса влаги в пористой среде на процессы теплообмена [4]. Зависимость массового выхода карбида кремния от исходной влажности представлена в работе [5]. В статье [6] рассматривалось влияние фильтрационного переноса на распределение температурного поля в печи. В работах [7, 8] представлено исследование влияния организации подвода теплоты в печи сопротивления на массовый выход карбида кремния. Помимо непосредственно моделирования, важным является вопрос оптимизации производства. Также важно изучение теплофизических свойств материалов шихты. В работе [9] представлены модель эффективного коэффициента теплопроводности шихты, а также модель изменения пористости среды. Ряд статей посвящен исследованиям получения мелкодисперсных материалов в лабораторных условиях. В работе [10] представлена математическая модель непрерывного производства карбида кремния в электротермическом реакторе с кипящим слоем. В статье [11] представлена математическая модель производства карбида кремния в электротермическом реакторе с кипящим слоем с периодической загрузкой взаимодействующих материалов. В работах [12, 13] получены зависимость массового выхода карбида кремния от исходного размера частиц песка, а также зависимость параметров синтеза SiC от относительного расхода углеродосодержащих частиц.

Процесс образования карбида кремния [14] пытались математически описать в нескольких работах [15–22]. Для получения численных результатов в каждой из них был сделан ряд серьезных упрощений.

Важно отметить, что процесс производства карбида кремния в печи сопротивления является длительным. Он может превышать 24 часа. При этом температура в самой печи распределена неравномерно, что затрудняет получение карбида кремния необходимого качества.

Стоит отметить, что производство карбида кремния является неавтоматизированным процессом. Например, сборка и разборка элементов печи и материалов шихты происходят вручную. Также отсутствует автоматическая регулировка мощности печи в зависимости от температуры зерна и шихты. Следовательно, разработка автоматизированной системы управления на основе полученной модели является актуальной задачей.

Загрузка промышленных печей сопротивления – сложная техническая задача. Она производится в корпусе загрузки на закрепленных пролетах. В процессе загрузки печь сопротивления заполняется шихтой в соответствии с условиями загрузки. Производится укладка зерна с устройством переходных контактов. По периметру печи устанавливаются разделительные перегородки. На нижнюю часть печи укладывается теплоизоляционная шихта. Также теплоизоляционная шихта укладывается между боковыми и разделительными перегородками. Далее устанавливают перегородки между шихтой и зерном и укладывают зерно. Укладка зерна является одним из наиболее сложных этапов загрузки печи. Необходимо удалить шихту из-под электродов и засыпать материал зерна до высоты перегородок. Далее убирают все перегородки внутри печи. Затем сверху зерна укладывают реакционную

шихту. Сверху реакционной шихты укладывают теплоизоляционную шихту. Процесс загрузки печи сопротивления не автоматизирован, что увеличивает общее время технологического процесса получения карбида кремния и усложняет получение эффективной математической модели, описывающей процесс карбидообразования.

В современных технических установках для управления протекающими в них процессами необходимо непрерывно получать информацию о технологических параметрах. Следовательно, математическая модель объекта управления будет являться обязательным элементом автоматизированной системы управления технологическим процессом получения карбида кремния.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Авторами [8] предложено математическое описание процесса получения карбида кремния, представленное дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\operatorname{div}(\lambda_{\text{эф}} \operatorname{grad} T) + q_v,$$

где T – температура, К; τ – время, с; $\lambda_{\text{эф}}$ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; q_v – мощность внутренних источников тепла в теле, Вт/м³, ρ – плотность, кг/м³, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/кг·К.

Смесь песка и кокса является пористым сыпучим материалом, следовательно изменение теплофизических свойств шихты было учтено с помощью соотношения:

$$\rho \cdot h = \rho_1 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot h_1 + \rho_2 \cdot \varepsilon \cdot h_2,$$

где ρ – плотность, h – энтальпия, ε – пористость, индекс «1» соответствует твердому телу, индекс «2» – газовой составляющей.

Эффективный коэффициент теплопроводности рассчитан по формуле:

$$\lambda_{\text{эф}}^m = \frac{2\lambda_1\lambda_2 + \varepsilon(1-\varepsilon)(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{2[\lambda_2(1-\varepsilon) + \lambda_1\varepsilon]}.$$

Мощность внутренних источников представляет собой параметр, состоящий из нескольких слагаемых:

$$q_v = q_{v,\text{эл}} - q_{v,\text{суш}} + q_{v,\text{ф}}, \quad (1)$$

где $q_{v,\text{эл}}$ – энерговыделение, приходящееся на нагреватель печи сопротивления (кern), $q_{v,\text{суш}}$ – теплота, поглощаемая в процессе сушки твердого компонента, $q_{v,\text{ф}}$ – теплота, переносимая фильтрационным потоком газовой компоненты.

Модель получения карбида кремния улучшена путем учета удельной теплоты «п» химических реакций:

$$q_{v,\text{хим}} = \sum_{j=1}^n q_{v,j} = \sum_{j=1}^n e_j \tilde{g}_{\text{хим},j},$$

где e_j – теплота химической реакции « j »; $\tilde{g}_{\text{хим},j}$ – интенсивность объемной генерации газа в химических реакциях, определяемая только видом химической реакции.

Эту теплоту можно учесть в уравнении (1) в виде дополнительного слагаемого. Следовательно, получим:

$$q_v = q_{v,\text{эл}} - q_{v,\text{суш}} + q_{v,\text{ф}} + q_{v,\text{хим}}.$$

Поставлены начальные и граничные условия задачи: в момент времени $\tau = 0$, $T = T_0 = 300$ К,

$$\begin{aligned} X = 0, \quad 0 \leq Y \leq 1; \quad Y = 0, \quad 0 \leq X \leq 1: -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_c - T_{жс}); \\ \text{при} \\ X = 1, \quad 0 \leq Y \leq 1; \quad Y = 1, \quad 0 \leq X \leq 1: -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_{жс} - T_c), \end{aligned}$$

где T_c – температура поверхностей стенок плавильной печи; $T_{жс}$ – температура окружающей среды; α – эквивалентный коэффициент теплоотдачи, X – относительная координата по оси X , Y – относительная координата по оси Y .

Общее удельное выделение летучих продуктов всех химических реакций можно вычислить как определенный интеграл по времени от суммы произведений интенсивностей объемной генерации газа в химических реакциях на соответствующую им дельта-функцию. Каждая дельта-функция принимает значение 1 от момента начала соответствующей химической реакции до момента ее окончания. Во все остальные моменты времени значение дельта-функции равно 0. В модели сделано допущение, что каждая реакция начинается при достижении соответствующей ей температуры начала химической реакции.

Теплота и температура начала химической реакции определены по справочным данным. Общее удельное выделение летучих продуктов химических реакций определено по экспериментальным данным. Интенсивность объемной генерации газа в химических реакциях определена как выход газообразного продукта на единицу массы загружаемой в печь шихты.

На рис. 1 приведены опытные данные изменения температуры от времени по поперечному сечению печи и расчетные температуры, полученные при математическом моделировании. Расчетные температурные кривые представлены с учетом комплексного параметра q_V , сопровождающего процесс получения карбида кремния.

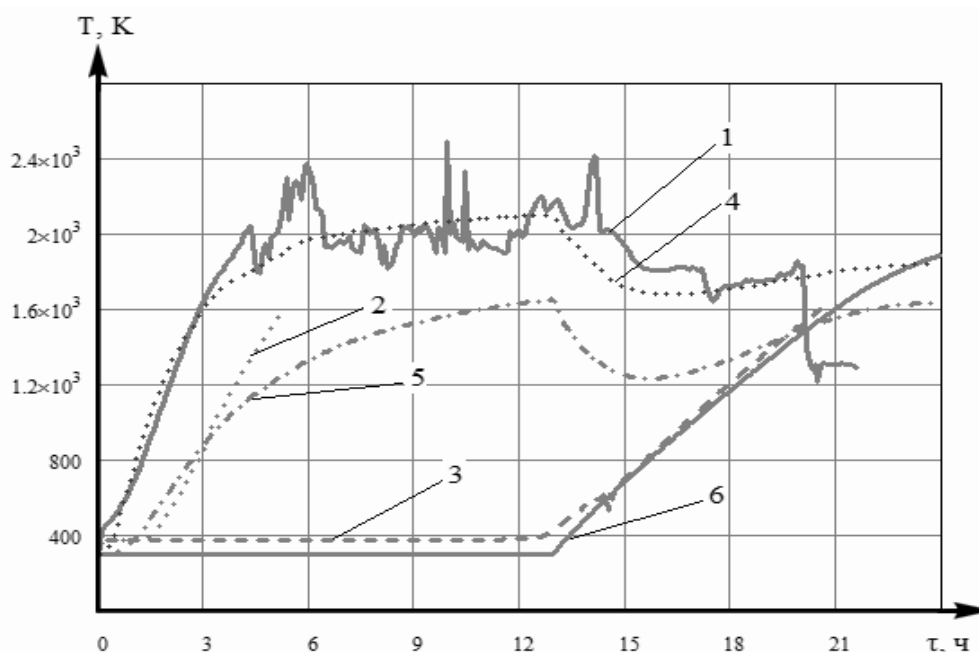


Рис. 1. Температура T зон печи для карбида кремния черного по результатам эксперимента и численного расчета (1, 2, 3 – экспериментальные кривые; 4, 5, 6 – расчетные кривые)

Fig. 1. Temperature of T zones of the furnace for black silicon carbide according to the results of experiment and numerical calculation (1, 2, 3 – experimental curves; 4, 5, 6 – design curves)

Расчетные температурные кривые №№ 4, 5, 6 показывают хорошее соответствие кривым №№ 1, 2, 3, полученным по результатам экспериментов.

Рис. 2 демонстрирует графический результат численного расчета трехмерных полей температур в печи для производства карбида кремния в различные моменты времени.

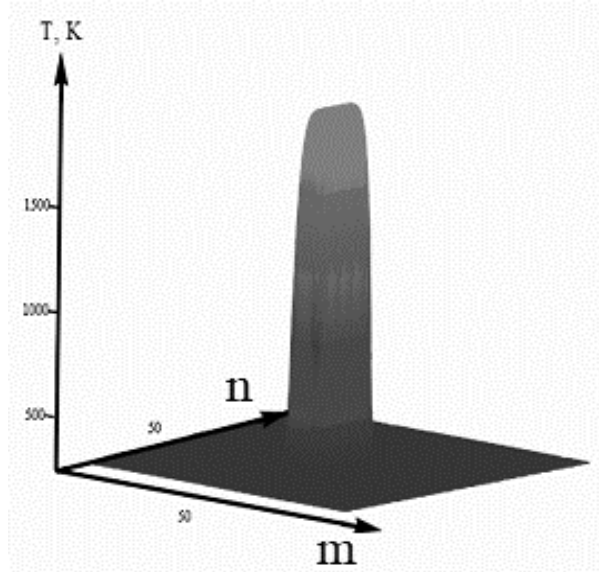


Рис. 2. Температурное поле в печи при производстве карбида кремния через четыре часа после подключения печи сопротивления к сети, $m \times n$ – размер расчетной сетки

Fig. 2. Temperature field in the furnace during the production of silicon carbide four hours after connecting the resistance furnace to the network, $m \times n$ – size of the computational grid

Цель управления процессом производства карбида кремния – поддержание необходимой температуры получения карбида кремния при максимально возможной производительности печи сопротивления и минимально возможных энергозатратах. Показателями эффективности процесса будут являться массовый выход карбида кремния с учетом полученных свойств материала, а также материально-энергетические затраты на производство. Можно выделить ряд возмущающих факторов, а именно: условия окружающей среды, наличие примесей в составе шихты, изменение формы зерна в процессе плавки, осадка материалов шихты. Основным регулирующим параметром является подводимая электрическая мощность. Также есть возможность менять состав шихты. В зависимости от применяемых в процессе производства марок песка и угля можно получать различные температурные поля в печи [23–30], следовательно, различный массовый выход карбида кремния и различные алгоритмы управления.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для составления математической модели, с помощью которой будет получена система управления, необходимо иметь данные об изменении температурного поля в процессе производства мелкодисперсного материала.

Приведем результаты экспериментальных исследований по определению температурных полей в печи сопротивления для производства карбида кремния на промышленном предприятии.

Измерение температур в печи сопротивления производилось непосредственно вольфрам-рениевой термопарой (№ 1) и хромель-алюмелевыми термопарами (№№ 2–5). Время эксперимента – 26 часов, что составляет полный цикл работы печи. Схема расположения

всех термопар в горизонтальной плоскости показана на рис. 3, где изображено продольное сечение керна и самого блока загрузки.

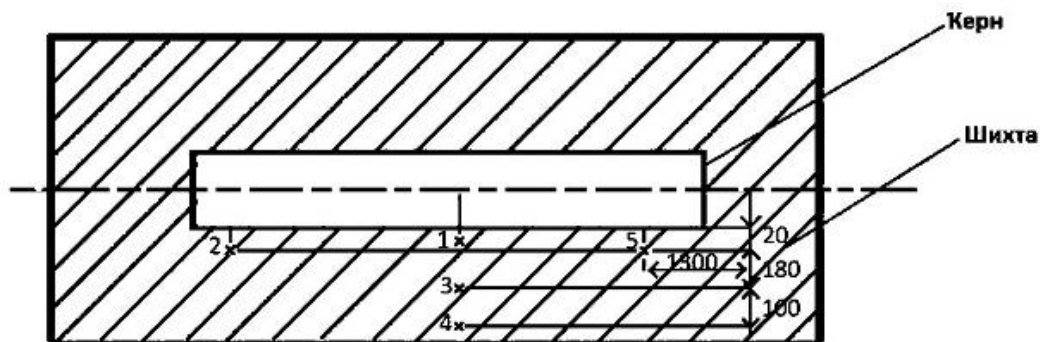


Рис. 3. Схема установки термопар в сечение печи в эксперименте

Fig. 3. Installation scheme of thermocouples in the cross section of the furnace in the experiment

В ходе эксперимента удалось снять массивы данных с термопар №№ 1, 3 и 4. Термопары №№ 2, 5 вышли из строя. Важно отметить, что термопара № 1 была расположена близко к керну у начала зоны образования карбида кремния, а термопара № 4 – в конце зоны карбидообразования.

Можно сделать вывод, что полную картину распределения температуры в печи получить с помощью только экспериментальных данных нельзя из-за невозможности работы термопар при температурах, достигаемых в точках 2 и 5. Поэтому температуры в центральной зоне печи можно снять с помощью датчиков, а температуры в зонах, близких к токоподводу, выгоднее получить при помощи математического моделирования.

На основе полученных с датчиков экспериментальных данных и математической модели можно разработать теоретические основы создания автоматизированной системы управления технологическим процессом производства карбида кремния. В качестве объекта управления можно выбрать печь сопротивления для производства карбида кремния. Важно учесть физические параметры на входе объекта управления, которые можно измерить или получить на основе математического моделирования [31–40]. Выходные параметры можно выбрать исходя из технологии получения карборунда. Далее необходимо проанализировать графики изменения входных и выходных величин по времени и составить схему причинно-следственных связей объекта управления.

В первом приближении в качестве входного параметра объекта управления можно взять подводимую мощность. Выходным параметром объекта управления будет температура.

Следующим шагом может быть проведение пассивного эксперимента. Так как производство является действующим и полный цикл одной печекампании превышает несколько недель, выбор такого метода исследования является обоснованным. Необходимо рассчитать математическое ожидание, дисперсию, центрированные значения, автокорреляционные и взаимокорреляционные функции, решить уравнение Винера – Хинчина, получить импульсную переходную характеристику по каждому из каналов и определить передаточные функции по каждому из каналов объекта управления.

Далее необходимо выбрать управляющее устройство для поддержания нужных значений основных параметров технологического процесса [41–47]. Затем необходимо получить передаточные функции. Далее оценить получившиеся результаты, сделать выводы о целесообразности учета зависимостей величин по различным каналам. После чего можно составить структурную схему получившейся системы управления. Для проверки адекватности

полученной модели необходимо получить графики переходных процессов и исследовать их по критериям качества. В результате автоматизированная система управления процессом образования карбида кремния представлена в виде блок-схемы на рис. 4.

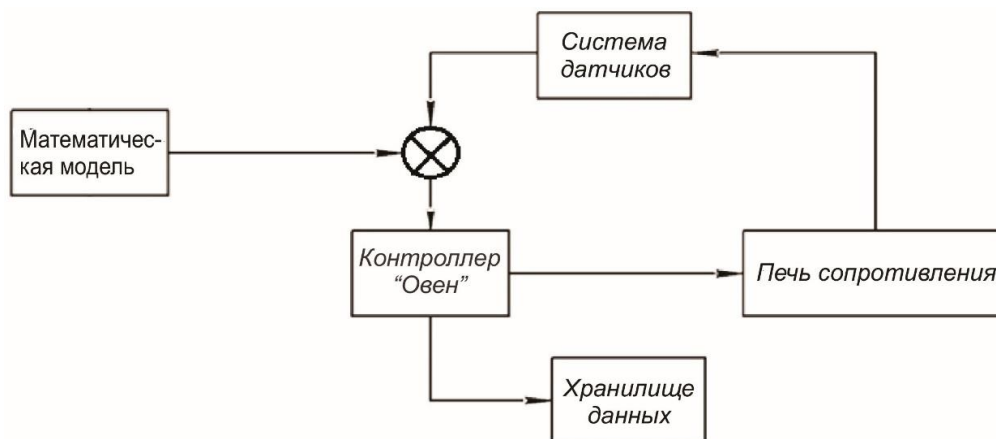


Рис. 4. Система автоматизированного управления процессом производства карбида кремния

Fig. 4. Automated control system for the silicon carbide production process

Алгоритм работы системы следующий: необходимо получить информацию об объекте управления с датчиков. Температура, полученная с помощью термопар и с помощью математической модели, сравнивается и делается вывод о сохранении или изменении подводимой мощности. Контроллер на основе информации с датчиков и модели расчета температурного поля вырабатывает управляющее воздействие на объект управления (печь сопротивления). Для совершенствования работы системы необходим сбор статистических данных в облачное хранилище. Разработанная система управления позволит увеличить массовый выход карбида кремния, подобрать наиболее энергоэффективные режимы работы печи и снизить экономические затраты.

Задающее устройство позволяет оператору вводить необходимые значения температуры вручную или использовать автоматический ввод. Вычислительное устройство позволяет получить требуемый закон управления. В качестве вычислительного устройства можно выбрать контроллер. Модель регулятора температуры можно исследовать с помощью численных методов. Имитационная модель позволит рассмотреть различные варианты работы системы регулирования температуры и найти оптимальные при заданных входных параметрах.

Важным этапом работы будет являться выбор критериев качества управления печью сопротивления, а также его обоснование. В качестве критерия управления эффективностью технологического процесса получения карбида кремния можно взять обеспечение максимального массового выхода карбида кремния за счет применяемых алгоритмов управления. Управление печью сопротивления будет основано на прогнозе распределения температуры в печи, полученном по математической модели, и дальнейшем поддержании необходимого уровня значений температуры. Так как есть прямая зависимость между образованием карбида кремния и температурой, такое управление будет оптимальным. Следует отметить, что при превышении определенного значения температуры происходит выгорание образовавшегося карбида кремния.

Для моделирования различных режимов работы печи сопротивления можно применить одну из существующих SCADA-систем. Она позволит рассмотреть в составе одной модели контроллер, объект управления, систему датчиков, исполнительные механизмы, хранилище данных и рабочие места операторов.

Если рассматривать процесс производства карбида кремния, то параметрами, влияющими на печь сопротивления, будут являться подаваемое напряжение и температура окружающей среды. В качестве выходных параметров можно рассмотреть температуру и концентрацию отходящего газа СО. Схема причинно-следственных связей объекта управления представлена на рис. 5.

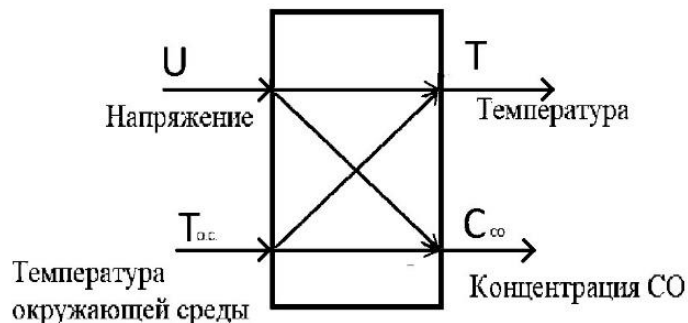


Рис. 5. Причинно-следственные связи объекта управления

Fig. 5. Cause-and-effect relationships of the control object

В ходе проведенных экспериментов получены данные по всем каналам объекта управления. Рассмотрен канал «напряжение – температура». Получена передаточная функция объекта управления по данному каналу с учетом запаздывания:

$$W(p) = \frac{0,116}{3,585p + 1} \cdot e^{-4,621p}$$

ВЫВОДЫ

Исследованию процесса производства карбида кремния посвящено достаточно большое количество работ. В статье представлен обзор современного состояния производства карбида кремния в промышленных условиях. Разработана система автоматизированного управления процессом производства данного материала мелкодисперсной структуры. Усовершенствована математическая модель технологического процесса производства карбида кремния за счет учета влияния на распределение температуры теплоты химических реакций. Подтверждение достоверности результатов осуществлено путем сопоставления экспериментальных данных с данными, полученными математическим моделированием, в ключевых точках, таких как поверхность зерна и периферия, с учетом особенностей работы печи сопротивления. Внедрение автоматизированной системы управления производственным процессом позволит экономить время, что актуально для длительного промышленного производства. Экономический эффект выразится в снижении себестоимости производства, повышении конкурентоспособности карбида кремния на мировом рынке.

REFERENCES

1. Кузеванов В. С., Закожурникова Г. С., Закожурников С. С. Модель тепломассопереноса в печах при производстве карбида кремния // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 7(171). С. 75–81. DOI: 10.15518/isjaee.2015.07.006

Kuzevanov V.S., Zakozhurnikova G.S., Zakozhurnikov S.S. Model of heat and mass transfer in furnaces in the production of silicon carbide. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy and ecology]. 2015. No. 7(171). Pp. 75–81. DOI: 10.15518/isjaee.2015.07.006. (In Russian)

2. Горяев А. Б., Закожурников С. С., Кузеванов В. С. Модель осадки шихты при производстве карбида кремния // Промышленная энергетика. 2016. № 9. С. 27–31. EDN: WWCMYR

Garyaev A.B., Zakozhurnikov S.S., Kuzevanov V.S. The model of charge precipitation in the production of silicon carbide. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy]. 2016. No. 9. Pp. 27–31. EDN: WWCMYR. (In Russian)

3. Kuzevanov V.S., Garyaev A.B., Zakozhurnikova G.S. The calculating study of the moisture transfer influence at the temperature field in a porous wet medium with internal heat sources. *Journal of Physics*. The calculating study of the: Conference Series. Moscow. 2017. Vol. 891. P. 012114. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012114

4. Ожерелкова Л. М., Савин Е. С. Температурная зависимость нестационарной теплопроводности твердых тел // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 2. С. 49–60. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-49-60

Ozherelkova L.M., Savin E.S. Temperature dependence of unsteady thermal conductivity of solids. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*. 2019. Vol. 7. No. 2. Pp. 49–60. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-49-60. (In Russian)

5. Kuzevanov V.S., Zakozhurnikova G.S., Zakozhurnikov S.S. Peculiarities of heat and mass transfer in porous moistened mediums at high thermal loads. *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299. Pp. 14–19. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.14

6. Мазлов А. А., Елфимов Н. А., Закожурникова Г. С., Закожурников С. С. Влияние фильтрационного переноса на изменение температуры в реакционной зоне печи сопротивления для получения карбида кремния // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XIX Бенардосовские чтения). Иваново, 2017. С. 208–210.

Mazlov A.A., Elfimov N.A., Zakozhurnikova G.S., Zakozhurnikov S.S. *Vliyanie fil'tratsionnogo perenosa na izmenenie temperatury v reaktsionnoy zone pechi soprotivleniya dlya polucheniya karbida kremniya* [The effect of filtration transfer on the temperature change in the reaction zone of the resistance furnace for the production of silicon carbide]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (XIX Benardosovskie chteniya)* [Materials of the International Scientific and Technical Conference “The state and prospects of development of electrical and thermal technology” (XIX Benardos readings)]. Ivanovo, 2017. Pp. 208–210. (In Russian)

7. Кузеванов В. С., Закожурников С. С., Горяев А. Б. Оптимизация процесса плавки карбида кремния с целью повышения ее производительности и снижения расхода электроэнергии // Промышленная энергетика. 2015. № 6. С. 29–33. EDN: UEAGQD

Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Garyaev A.B. Optimization of the silicon carbide melting process in order to increase its productivity and reduce energy consumption. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy]. 2015. No. 6. Pp. 29–33. EDN: UEAGQD. (In Russian)

8. Кузеванов В. С., Закожурников С. С., Закожурникова Г. С., Горяев А. Б. Модели процессов и расчет температурного поля в печи сопротивления для производства карбида кремния // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. № 4. С. 21–29. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.4.021-029

Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S., Garyaev A.B. Process models and calculation of the temperature field in a resistance furnace for the production of silicon carbide. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Energy University]. 2017. No. 4. Pp. 21–29. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.4.021-029. (In Russian)

9. Закожурников С. С. Совершенствование процесса производства карбида кремния путем изменения организации подвода теплоты: специальность 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика»: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2016. 22 с.

Zakozhurnikov S.S. *Sovershenstvovanie processa proizvodstva karbida kremniya putyom izmeneniya organizatsii podvoda teploty* [Improvement of the silicon carbide production process by changing the organization of heat supply]: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of technical sciences 05.14.04. Moscow, 2016. 22 p. (In Russian)

10. Kuzevanov V.S., Garyaev A.B., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S. Model of continuous production of fine silicon carbide. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Workshop «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019»*. Krasnoyarsk, 2019. P. 32106. DOI: 10.1088/1757-899X/537/3/032106

11. 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. *Journal of Physics: Conference Series: 3*. Moscow, 2020. P. 022054. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/2/022054

12. 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. Vol. 316. Pp. 147–152. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.316.147

13. Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S. Silicon carbide synthesis investigation in an electrothermal fluidized bed. *Journal of Materials Science*. 2023. Vol. 58. No. 43. Pp. 16742–16752. DOI: 10.1007/s10853-023-09071-5

14. Семейко К. В., Малиновский А. И., Гребеньков А. Ж. и др. Разработки технологий получения карбида кремния (обзор) // Вестник НЯЦ РК. 2021. № 2. С. 30–41. DOI: 10.52676/1729-7885-2021-2-30-41

Semeiko K.V., Malinovsky A.I., Grebenkov A.Zh. et al. Development of technologies of silicon carbide producing (review). *NNC RK BULLETIN*. 2021. No. 2. Pp. 30–41. DOI: 10.52676/1729-7885-2021-2-30-41. (In Russian)

15. Полубелова А. С., Крылов В. Н., Карлин В. В., Ефимова И. С. Производство абразивных материалов. Ленинград: Машиностроение, 1968. 180 с.

Polubelova A.S., Krylov V.N., Karlin V.V., Efimova I.S. *Proizvodstvo abrazivnykh materialov* [Abrasive materials production]. Leningrad: Mashinostroenie, 1968. 180 p. (In Russian)

16. Кац И. С. Образование карбида кремния в промышленной печи электросопротивления // Абразивы. 1970. № 3. С. 8.

Katz I.S. *Obrazovanie karbida kremniya v promyshlennoy pechi elektrosoprotivleniya* [Formation of silicon carbide in an industrial electrical resistance furnace]. *Abrazivy* [Abrasives]. 1970. No. 3. P. 8. (In Russian)

17. Zinkle S.J. Fusion materials science: overview of challenges and recent progress. *Physics of Plasmas*. 2005. Vol. 12. P. 058101.

18. Рожнова Т. В. Структура и свойства медных порошковых изделий сельскохозяйственного назначения с карбидом кремния, изготовленных электроконтактным спеканием // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 4(90). С. 178–181. EDN: HUXKXO

Rozhnova T.V. Structure and properties of copper powder products for agricultural purposes with silicon carbide made by electrocontact sintering. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Orenburg State Agricultural University]. 2021. No. 4 (90). Pp. 178–181. EDN: HUXKXO. (In Russian)

19. Мизонов В. Е., Костарев В. В., Зайцев В. А. Моделирование влагопереноса в многослойной пористой среде при неравномерной укладке слоев материала // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 4. С. 76–79. EDN: QZXKHN

Mizonov V.E., Kostarev V.V., Zaitzev V.A. Modeling of moisture transfer in multilayer porous medium at uneven stacking of material layers. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Energy University]. 2013. No. 4. Pp. 76–79. EDN: QZXXHN. (In Russian)

20. Балагуров И. А., Мизонов В. Е., Berthiaux H. Gatamel S. Моделирование кинетики смешивания разнородных сыпучих материалов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2014. № 6. С. 67–70. EDN: TEJAYX

Balagurov I.A., Mizonov V.E., Berthiaux N., Gatamel S. Simulation of mixing kinetics of dissimilar granular materials. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Energy University]. 2014. No. 6. Pp. 67–70. EDN: TEJAYX. (In Russian)

21. Мисбахов Р. Ш., Мизонов В. Е. Моделирование теплопроводности в составной области с фазовыми переходами // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 4. С. 39–44. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.4.039-043

Misbakhov R.Sh., Mizonov V.E. Simulation of heat conduction in a composite domain with phase transformation. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Energy University]. 2015. No. 4. Pp. 39–44. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.4.039-043. (In Russian)

22. Митрофанов А.В., Шпейнова Н.С., Camelo A.F. и др. Расчетно-экспериментальное исследование тепловой обработки дисперсного топлива в аппарате с кипящим слоем // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 1. С. 58–62. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.058-062

Mitrofanov A.V., Shpeynova N.S., Camelo A.F. et al. Experimental and computational study of thermal treatment of particulate fuel in a fluidized bed reactor. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Energy University]. 2016. No. 1. Pp. 58–62. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.058-062. (In Russian)

23. Bozkurt Y.E., Emanetoğlu U., Yıldız A. et al. 3D printable CNTs and BN hybridized PEEK composites for thermal management applications. *Journal of Materials Science*. 2023. Vol. 58. No. 38. Pp. 1–14. DOI: 10.1007/s10853-023-08923-4

24. Reva D., Lisyatnikov M., Prusov E. Mechanical behavior of aluminum matrix composites in the elements of building structures. *Proceedings of MPCPE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Vol. 335. DOI: 10.1007/978-3-031-30570-2_29

25. Wu Y., Zhao R., Liang B. et al. Construction of C/SiC–Cu₃Si–Cu interpenetrating composites for long-duration thermal protection at 2500°C by cooperative active-passive cooling. *Composites Part B: Engineering*. 2023. Vol. 266. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.111015

26. Zhao Ch., Tu Z., Mao J. The dynamic thermophysical properties evolution and multi-scale heat transport mechanisms of 2.5D C/SiC composite under high-temperature air oxidation environment. *Composites Part B: Engineering*. 2023. Vol. 263. P. 110831. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.110831

27. Feng K., Hu Sh., Li L. et al. Preparation of low residual silicon content Si–SiC ceramics by binder jetting additive manufacturing and liquid silicon infiltration. *Journal of the European Ceramic Society*. 2023. Vol. 43. No. 13. Pp. 5446–5457. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2023.05.038

28. Zheng Yi, Zou J., Liu W. et al. High pressure sintering of fully dense tantalum carbide ceramics with limited grain growth. *Journal of the European Ceramic Society*. 2023. Vol. 43. No. 12. Pp. 5117–5124. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2023.04.032

29. Zhang S., Zhang J., Li F. et al. Thermal conductivity of Ca α -SiAlON ceramics with varying m and n values. *Journal of the American Ceramic Society*. 2023. Vol. 106. No. 10. Pp. 5642–5647. DOI: 10.1111/jace.19264

30. Xu J., Tatarko P., Chen L. et al. High-strength SiC joints fabricated at a low-temperature of 1400°C using a novel low activation filler of Praseodymium. *Journal of the American Ceramic Society*. 2023. Vol. 106. No. 10. Pp. 5679–5688. DOI: 10.1111/jace.19229

31. Mousavi A., Vyatkin V. Energy efficient agent function block: A semantic agent approach to IEC 61499 function blocks in energy efficient building automation systems. *Automation in construction*. 2015. Vol. 54. Pp. 127–142. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.03.007

32. Sleptsov V.V., Afonin V.L., Ablaeva A.E., Dinh B. Development of an information measuring and control system for a quadcopter. *Russian technological journal*. 2021. No. 9(6). Pp. 26–36. DOI: 10.32362/2500-316X-2021-9-6-26-36

33. Лавренов С. С. Разработка автоматизированной системы сортировки // Тезисы докладов XXIX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М., 2023. С. 152.

Lavrenov S.S. *Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy sortirovki* [Development of an automated sorting system]. *Tezisy dokladov XXIX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoj konferencii studentov i aspirantov* [Abstracts of reports of the XXIX International Scientific and Technical Conference of Undergraduate and Postgraduate Students “Radio electronics, electrical engineering and power engineering”]. Moscow, 2023. P. 152. (In Russian)

34. Лавренов С. С., Закожурников С. С. Применение фотоэлектрических датчиков на производстве // Сборник докладов Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА «Оптические технологии, материалы и системы». М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. С. 206–209.

Lavrenov S.S., Zakozhurnikov S.S. *Primenenie fotoelektricheskikh datchikov na proizvodstve* [Application of photovoltaic sensors in production]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoj konferencii “Opticheskie tekhnologii, materialy i sistemy” IPTIP RTU MIREA* [A collection of Reports of the International Scientific and Technical Conference “Optical technologies, materials and systems” IPTIP RTU MIREA]. Moscow: MIREA – Rossijskiy tekhnologicheskij universitet, 2022. Pp. 206–209. (In Russian)

35. Меркулов А. В., Харитонов К. Ю., Закожурников С. С. и др. Некоторые вопросы создания электронно-управляющих систем вращающихся объектов // Сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием «Инновационные технологии в электронике и приборостроении». М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2021. С. 212–215.

Merkulov A.V., Kharitonova K.Yu., Zakozhurnikov S.S. et al. *Nekotorye voprosy sozdaniya elektronno-upravlyayushchih sistem vrashchayushchihsya ob"ektov* [Some issues of creating electronic control systems of rotating objects]. *Sbornik dokladov Rossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Innovacionnye tekhnologii v elektronike i priborostroenii»* [Collection of reports of the Russian Scientific and Technical Conference with international participation “Innovative technologies in electronics and instrumentation”]. Moscow: MIREA – Rossijskiy tekhnologicheskij universitet, 2021. Pp. 212–215. (In Russian)

36. Zakozhurnikov S., Zakozhurnikova G. Development of a control system for sorting agricultural products according to specified criteria. *E3S Web of Conference*. 2023. Vol. 390. P. 03019. DOI: 10.1051/e3sconf/202339003019

37. Zakozhurnikov S., Gorshunova T., Pronina E., Raff O. Development of an automated lighting control system in agricultural premises to save energy resources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1231. P. 012061. Pp. 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/1231/1/012061

38. Tang Y., Li L., Liu X. State-of-the-art development of complex systems and their simulation methods. *Complex system modeling and simulation*. 2021. Vol. 1. No. 4. Pp. 271–290. DOI: 10.23919/CSMS.2021.0025
39. Mammadova K.A., Aliyeva E.N. Solving the problem of building an automatic control system for the process of water chemical treatment using fuzzy logic. *Lecture Notes in networks and systems*. 2022. Vol. 362. Pp. 748–756. DOI: 10.1007/978-3-030-92127-9_99
40. Zhang L. Electric automation control simulation system based on intelligent technology. *Lecture Notes on data engineering and communications technologies*. 2022. Vol. 125. Pp. 732–738. DOI: 10.1007/978-3-030-97874-7_98
41. Renjini G.S., Thangavelusamy D. Robust reference tracking and load rejection on non-linear system using controllers. *Gazi University Journal of Science*. 2022. Vol. 35. No. 4. Pp. 1454–1569. DOI: 10.35378/gujs.947882
42. Li J., Liu C., Sun Y., Shao L. A new event-triggered adaptive tracking controller for nonlinear systems with unknown virtual control coefficients. *European journal of control*. 2022. Vol. 69. P. 100759. DOI: 10.1016/j.ejcon.2022.100759
43. Dorokhov A., Aksenov A., Sibirev A. Results of laboratory studies of the automated sorting system for root and onion crops. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No. 6. P. 1257. DOI: 10.3390/agronomy11061257
44. Morozov S., Kuzmin K., Vershinin V. Development of a simulation automated system for address sorting of correspondence. *Lecture Notes in networks and systems: XIV international scientific conference “INTERAGROMASH 2021”*. Vol. 247. 2022. Pp. 927–933.
45. Tamizi M.G., Kashani A.A., Azad F.A., Kalthor A. Experimental study on a novel simultaneous control and identification of a 3-DOF delta robot using model reference adaptive control. *European journal of control*. 2022. Vol. 67. No. 5. P. 100715. DOI: 10.1016/j.ejcon.2022.100715
46. Azad F.A., Ansari Rad S., Hairi Yazdi M.R. et al. Dynamics analysis, offline–online tuning and identification of base inertia parameters for the 3-DOF Delta parallel robot under insufficient excitations. *Meccanica*. 2022. Vol. 57. No. 2. Pp. 473–506.
47. Zakozhurnikov S., Pikhtilkova O., Pronina E., Raff O. The smart home automated control system development. *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3102 (1). P. 030024. DOI: 10.1063/5.0200045

Информация об авторах

Закожурников Сергей Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра высшей математики – 3, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, МИРЭА – Российский технологический университет;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

zakozhurnikov@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2354-9656>, SPIN-код: 1864-0437

Закожурникова Галина Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, кафедра теплотехники и гидравлики, Волгоградский государственный технический университет;

400005, Россия, Волгоград, пр-т Ленина, 28;

galya.vlz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4870-0749>, SPIN-код: 7209-9481

Горшунова Татьяна Алексеевна, канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра высшей математики – 3, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, МИРЭА – Российский технологический университет;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

gorshunova@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9580-595X>, SPIN-код: 6120-6367

Пихтилькова Ольга Александровна, канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра высшей математики – 3, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, МИРЭА – Российский технологический университет;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

pihtilkova@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4632-5158>, SPIN-код: 5589-7411

Пронина Елена Владиславовна, канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра высшей математики – 3, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, МИРЭА – Российский технологический университет;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

pronina@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2447-7175>, SPIN-код: 3391-3440

Information about the authors

Sergei S. Zakozhurnikov, Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Higher Mathematics – 3 Department, MIREA – Russian Technological University;

119454, Russia, Moscow, 78 Vernadsky avenue;

zakozhurnikov@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2354-9656>, SPIN-code: 1864-0437

Galina S. Zakozhurnikova, Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Heat Engineering and Hydraulics Department, Volgograd State Technical University;

400005, Russia, Volgograd, 28 Lenin avenue;

galya.vlz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4870-0749>, SPIN-code: 7209-9481

Tatiana A. Gorshunova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate professor, Higher Mathematics – 3 Department, MIREA – Russian Technological University;

119454, Russia, Moscow, 78 Vernadsky avenue;

gorshunova@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9580-595X>, SPIN-code: 6120-6367

Olga A. Pikhtilkova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate professor, Higher Mathematics – 3 Department, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University;

119454, Russia, Moscow, 78 Vernadsky avenue;

pihtilkova@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4632-5158>, SPIN-code: 5589-7411

Elena V. Pronina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate professor, Higher Mathematics – 3 Department, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University;

119454, Russia, Moscow, 78 Vernadsky avenue;

pronina@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2447-7175>, SPIN-code: 3391-3440