

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. An Overview of Ocean Energy Activities in 2023. Annual Report. IEA-OES. – URL: <https://tethys.pnnl.gov/publications/iea-oes-annual-report-overview-ocean-energy-activities-2023>.
2. Review of ocean tidal, wave and thermal energy technologies / N. Khan, A. Kalair, N. Abas, A. Haider // *Renew Sustainable Energy*. 2017. Vol. 72. P. 590–604.
3. Parameter Analysis on OTEC using Hybrid Cycle / Ya. Ikegami, T. Yasunaga, T. Okuno // *OTEC*. 2019. Vol. 24. P. 41–46.
4. Analysis of optimization in an OTEC plant using organic Rankine cycle. *Renew* / M.H. Yang, R.H. Yeh. // *Energy*. 2014. Vol. 68. P. 25–34.

УДК 621.783.223:621.365

**А. Д. Апасова, И. А. Левицкий, К. С. Шатохин**  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Россия

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛА

**Аннотация.** *В современной промышленности импульсный нагрев металла становится все более востребованным и перспективным методом обработки материалов. Этот процесс играет важную роль в различных отраслях промышленности, таких как автомобильное производство, машиностроение, энергетика и другие. Оптимизация режимов импульсного нагрева металлов имеет принципиальное значение для повышения эффективности производственных процессов, улучшения качества продукции и сокращения затрат.*

*В данной статье рассматривается проблема совершенствования режимов импульсного нагрева металла с целью повышения эффективности этого процесса. Акцент делается на разработке новых подходов к управлению нагревом посредством созданной программы для моделирования режимов нагрева металла.*

**Ключевые слова:** *режим нагрева, АСУ ТП, импульсный нагрев, нагревательные печи, математическая модель, газовая горелка, температура, металл.*

**Abstract.** *In modern industry, pulsed metal heating is becoming an increasingly popular and promising method of material processing. This process plays an important role in various industries such as automotive manufacturing, mechanical engineering, energy and others. Optimization of pulse heating modes of metals is of fundamental importance for increasing the efficiency of production processes, improving product quality and reducing costs.*

*This article discusses the problem of improving the modes of pulsed metal heating in order to increase the efficiency of this process. The emphasis is on the development of new approaches to heating control through the created program for modeling metal heating modes.*

**Key words:** *heating mode, automatic process control system, impulse heating, heat furnaces, mathematical model, gas burner, temperature, metal.*

Одним из способов для нахождения оптимального времени работы импульсных газовых горелок в методических печах, является использование метода математического моделирования [1].

Для этого необходимо разработать математическую модель, которая учитывает различные параметры, такие как температура в печи, расход газа, продолжительность работы горелок и другие факторы, влияющие на процесс обжига.

Такой подход позволяет проводить анализ и оптимизацию работы импульсных газовых горелок в методических печах, что способствует повышению эффективности процесса обжига и экономии ресурсов [2–4].

Импульсный нагрев основывается на применении системы позиционного автоматического прерывания (ПАП) или импульсного режима нагрева. Система ПАП является эффективным способом регулирования температуры и времени работы в технологических процессах, таких как обжиг и нагрев материалов. В этой системе нагрева управление осуществляется путем автоматического прерывания подачи энергии в момент достижения заданной температуры. Это позволяет поддерживать стабильность процесса нагрева и предотвращать перегрев материалов. Коэффициенты теплоотдачи конвекцией  $\alpha_{\text{конв}}$  могут достигать 300 Вт/(м<sup>2</sup>·К) и более [5].

Разработана программа моделирования на основе численных методов, таких как метод конечных элементов или метод конечных разностей. Эти методы позволяют аппроксимировать уравнения теплопроводности и передачи тепла в системе, описывающие распределение температуры внутри заготовки и печи.

При работе с программой для начала необходимо определить математическую модель, учитывающую взаимодействие заготовки с окружающей средой в печи, тепловые потоки и параметры газовой среды внутри печи (температура и коэффициент теплопередачи  $\alpha_{\text{конв}}$ ). Эти данные используются для определения теплового равновесия между заготовкой и печью. Переключение режимов «включено – выключено» происходит при достижении заданной продолжительности нагрева  $\tau$  либо заданного перепада температур по толщине заготовок  $\Delta T$ .

На рисунке 1 показаны температурные режимы печи и нагрева металла со следующими параметрами:

- температура в методической зоне, где нет горелок – 800 °С,  $\alpha_{\text{конв}}$  – 100 Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- температура и  $\alpha_{\text{конв}}$  в сварочной зоне для случаев «включено» и «выключено», соответственно: 1700 °С и 300 Вт/(м<sup>2</sup>·К), 1100 °С и 100 Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- температура и  $\alpha_{\text{конв}}$  в томильной зоне для случаев «включено» и «выключено», соответственно: 1300 °С и 200 Вт/(м<sup>2</sup>·К), 1100 °С и 100 Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- время работы и отключения горелок – 1 минута.

В ходе изучения процесса импульсного нагрева и разработки программы для расчета внутреннего теплообмена были проведены расчеты, которые выявили динамику для дальнейшего продолжения исследования в данном направлении. Программа позволяет учитывать сложные параметры внутреннего теплообмена, включая температурные поля различных элементов системы, скорость

изменения температуры, коэффициенты теплопередачи, теплоемкость материалов и другие факторы, влияющие на эффективность процесса нагрева.

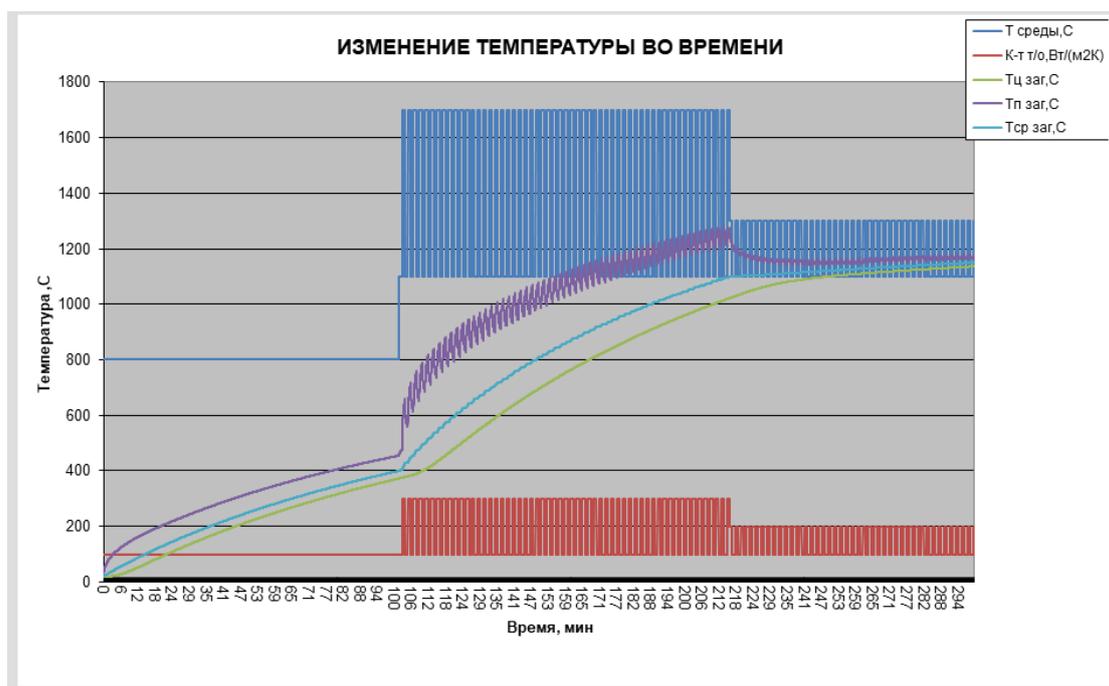


Рис. 1. Импульсный режим нагрева металла

Благодаря разработанной программе можно проводить виртуальные эксперименты, оптимизировать рабочие параметры системы импульсного нагрева, предсказывать тепловые процессы и распределение температур внутри нагреваемых материалов. Это позволяет сократить время и затраты на проведение физических экспериментов и исследований, а также повысить эффективность производственных процессов.

### Список использованных источников

1. Фастыковский А.Р. Энергосберегающие технологии получения сортовых прокатных профилей // Технические науки – от теории к практике. 2016. № 11(59). С. 52–56.
2. Коробейников В.В., Ткаченко С.С. Энергосберегающие нагревательные агрегаты нового поколения // Литье и металлургия. 2017. № 3(88). С. 34–38.
3. Strogonov K.V., A.A. Zdarov. Energy saving of high-temperature processes by intensive melt degassing // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1683. The Third Conference «Problems of Thermal Physics and Power Engineering». 2020. 052029.
4. Strogonov K.V., Borisov, A.A., Murashov V.A., Lvov D.D. Calculation of individual elements of enclosing structures of a continuous steelmaking unit // Proceedings of the 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2023.
5. Boom R. The discussions of best heating technology of rolling furnace // Ironamk. Steelmak. 2014. Vol. 41. Pp. 647–652.

УДК 669.162.1

Г. Г. Бардавелидзе, Н. А. Спирин

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

<sup>2</sup> ООО «Научно-производственное внедренческое предприятие ТОРЭКС» (ООО «НПВП ТОРЭКС»), г. Екатеринбург, Россия

## БЛОК ГОРЕНИЯ УГЛЕРОДА В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ООО «НПВП ТОРЭКС»

**Аннотация.** *Отражено влияние блока горения углерода на расчеты тепломассообмена в слое на математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС». Представлена эмпирическая формула, характеризующая долю выгоревшего углерода на том или ином расчетном шаге, математической модели. На примере одного расчетного шага представлен расчет количества тепла выделяемого при сгорании углерода на определенном участке обжиговой машины.*

**Ключевые слова:** *обжиговая машина, расчетный шаг, удельная тепловая мощность, количество тепла, углерод, коксик, математическая модель ООО «НПВП ТОРЭКС», насыпная масса окатышей, окисленные железистые кварциты Михайловского месторождения.*

**Abstract.** *The influence of the carbon combustion block on the calculations of heat and mass transfer in the layer is reflected on the mathematical model of NPVP TOREKS LLC. An empirical formula is presented that characterizes the proportion of burned carbon at a particular calculation step of the mathematical model. Using the example of one calculation step, the calculation of the amount of heat released during the combustion of carbon in a certain section of the roasting machine is presented.*

**Key words:** *indurating machine, calculated step, specific thermal power, amount of heat, carbon, coke, mathematical model of NPVP TOREKS LLC, bulk mass of pellets, oxidized ferruginous quartzites of the Mikhailovskoe deposit.*

Внедрение в производство новых видов руд и концентратов является важной задачей сохранения и развития промышленного потенциала экономики России. В условиях металлургии Российской Федерации перспективным является использование гематитовых руд, запасы которых составляют 7 млрд т [1]. В настоящее время для производства железорудных обожженных окатышей в Российской Федерации, в основном, применяются магнетитовые руды и их запасы не бесконечны. Дополнительным источником железорудного сырья могут стать гематитовые руды и «хвосты». Гематитовые материалы являются, в том числе, вторичным продуктом обогащения магнетитовых руд, таким образом, актуальность их использования не вызывает сомнений.

При исследованиях новых видов шихтовых компонентов для производства обожженных окатышей возникает необходимость прогнозирования результатов внедрения данных компонентов в действующее или новое производство. Для компетентного внедрения новых материалов (с обоснованным прогнозированием параметров производства) необходимы расчеты на математической модели. Таким образом, результаты физико-химических, лабораторных и полупромышленных исследований шихтовых компонентов (в том числе концентратов),