

DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-2-83-105

# Гибридная интеллектуальная система машинного обучения для моделирования процессов обработки фосфатного рудного сырья

**А. Ю. Пучков<sup>1</sup>, Я. А. Федулов<sup>1</sup>, С. В. Незамаев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск, Россия

<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва, Россия  
[putchkov63@mail.ru](mailto:putchkov63@mail.ru)

**Аннотация.** Представлены результаты исследования, целью которого являлось создание интеллектуальной системы машинного обучения для моделирования процессов агломерации шихты при обработке фосфатного рудного сырья. Актуальность исследования обоснована необходимостью совершенствования информационного обеспечения процессов управления технологическими системами в условиях цифровой трансформации производственной среды, проводимой в рамках четвертой промышленной революции и характеризуемой массовым внедрением индустриального Интернета вещей, что приводит к лавинообразному увеличению объемов технологических данных. Их обработка современными методами анализа, в том числе методами искусственного интеллекта, способна повысить качество принимаемых решений и обеспечить конкурентные преимущества. Научную новизну результатов исследования составляет структура предложенной гибридной интеллектуальной системы машинного обучения для моделирования процессов обработки фосфатного рудного сырья, в основе которой лежит совместное применение динамической модели агломерационного процесса в среде Simulink и глубокой нейронной сети. Архитектура нейронной сети разработана с учетом специфики математического описания процесса агломерации и включает входные полносвязные слои, принимающие результаты измерений переменных технологического процесса, а также рекуррентный слой, обрабатывающий объединенную последовательность с выходов полносвязных слоев. Интеграция Simulink-модели и глубокой нейронной сети делает возможным быструю адаптацию интеллектуальной системы под конкретную агломерационную машину за счет применения двухэтапной процедуры машинного обучения: сначала на имитационной модели Simulink, а затем на реальном объекте. Учитывая значительную инерционность процессов, сопровождающих агломерацию, такой подход обеспечивает оперативное изменение настройки гибридной интеллектуальной системы машинного обучения под новый состав сырья и технологические параметры. Разработана программа, предоставляющая удобный графический интерфейс для подготовки и применения интеллектуальной системы, а проведенные имитационные эксперименты показали, что процесс ее дообучения под новые технологические параметры проходит значительно быстрее первичного обучения при сохранении высокой точности получаемых результатов моделирования.

**Ключевые слова:** переработка рудного сырья, цифровые модели агломерации, интеллектуальные системы машинного обучения, глубокие рекуррентные нейронные сети, системы управления технологическими процессами

**Для цитирования:** Пучков А. Ю., Федулов Я. А., Незамаев С. В. Гибридная интеллектуальная система машинного обучения для моделирования процессов обработки фосфатного рудного сырья // Прикладная информатика. 2024. Т. 19. № 2. С. 83–105. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-2-83-105

# Hybrid intelligent machine learning system for modeling phosphate ore processing processes

A. Puchkov<sup>1</sup>, Ya. Fedulov<sup>1</sup>, S. Nezamaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Branch of the National Research University "MPEI" in Smolensk, Smolensk, Russia

<sup>2</sup>D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow, Russia

<sup>\*</sup>puchkov63@mail.ru

**Abstract.** The results of a study are presented, the purpose of which was to create an intelligent machine learning system for modeling the processes of charge agglomeration during processing of phosphate ore raw materials. The relevance of the study is justified by the need to improve the information support of technological systems management processes in the context of the digital transformation of the production environment, carried out within the framework of the Fourth Industrial Revolution and characterized by the massive introduction of the industrial Internet of things, which leads to an avalanche-like increase in the volume of technological data. Their processing using modern analysis methods, including artificial intelligence methods, can improve the quality of decisions made and provide competitive advantages. The scientific novelty of the research results is the structure of the proposed hybrid intelligent machine learning system for modeling phosphate ore processing processes, which is based on the joint use of a dynamic model of the sintering process in the Simulink environment and a deep neural network. The architecture of the neural network was developed taking into account the specifics of the mathematical description of the agglomeration process and includes input fully connected layers that receive measurement results of process variables, as well as a recurrent layer that processes the combined sequence from the outputs of fully connected layers. The integration of a Simulink model and a deep neural network makes it possible to quickly adapt an intelligent system to a specific sintering machine through the use of a two-stage machine learning procedure – first on a Simulink simulation model, and then on a real object. Taking into account the significant inertia of the processes accompanying agglomeration, this approach ensures prompt changes in the settings of the hybrid intelligent machine learning system for the new composition of raw materials and technological parameters. A program has been developed that provides a convenient graphical interface for preparing and using an intelligent system, and simulation experiments have shown that the process of additional training for new technological parameters is much faster than initial training while maintaining high accuracy of the obtained modeling results.

**Keywords:** ore processing, digital agglomeration models, intelligent machine learning systems, deep recurrent neural networks, process control systems

**For citation:** Puchkov A., Fedulov Ya., Nezamaev S. Hybrid intelligent machine learning system for modeling phosphate ore processing processes. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2024, vol.19, no.2, pp.83-105 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-2-83-105

## Введение

**П**родукция, получаемая из фосфатного сырья (комплексные удобрения, кормовые фосфаты, фосфатсодержащие химические соединения, желтый

фосфор), востребована во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства. Кроме того, переработка фосфатного рудного сырья применяется при утилизации отходов горно-обогатительных комбинатов,