

Методы искусственного интеллекта в оценке степени износа футеровочной брони конусных дробилок

В.С. Великанов¹✉, Н.В. Дёрина², О.Р. Панфилова²

¹Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

²Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация

✉rizhik_00@mail.ru

Резюме

Конусные дробилки среднего и мелкого дробления эксплуатируются на горнодобывающих предприятиях при дроблении материалов с достаточно широким диапазоном физико-механических свойств. Обзор и анализ научно-технической литературы по проблематике закономерностей процесса дробления в конусных дробилках определил следующие направления исследований: зависимости между гранулометрическим составом материала и параметрами профиля дробящего пространства; интенсивность изнашивания футеровочной брони подвижного и неподвижного конусов; установление оптимального профиля дробящего пространства; минимизация расхода высокомарганцевистой стали; оптимизация затрат на ремонт и обслуживание дробильного оборудования и др. Состояние футеровочной брони является одним из основных определяющих факторов в изменении качественно-количественных характеристик процесса мелкого дробления. Установлено, что значительное число отказов конусных дробилок (96 %) приводят к внеплановым ремонтам. Целью исследования является реализация нового подхода в мониторинге состояния футеровочной брони. В статье применялся комплексный подход, который включает в себя научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований по рассматриваемой проблематике. Методологическую основу исследований составляют теория нечеткой логики и нечетких множеств, а также методы системного анализа. Научная новизна работы заключается в реализации возможности использования методов искусственного интеллекта в оценке состояния футеровочной брони конусных дробилок. Определен подход в контроле износа футеровочной брони конусных дробилок мелкого и среднего дробления.

Ключевые слова

полезные ископаемые, дробилка, футеровочная броня, износ, искусственный интеллект, моделирование, нейронная сеть

Для цитирования

Великанов В.С. Методы искусственного интеллекта в оценке степени износа футеровочной брони конусных дробилок / В.С. Великанов, Н.В. Дёрина, О.Р. Панфилова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 202–211. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).202-211

Информация о статье

поступила в редакцию: 7.06.2022 г.; поступила после рецензирования: 16.06.2022 г.; принята к публикации: 17.06.2022 г.

Artificial Intelligence methods in assessing the degree of wear of the lining armor of cone crushers

V.S. Velikanov¹✉, N.V. Derina², O.R. Panfilova²

¹Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, the Russian Federation

²Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, the Russian Federation

✉rizhik_00@mail.ru

Abstract

Cone crushers of medium and fine crushing are operated at mining enterprises when crushing materials with a fairly wide range of physical and mechanical properties. A review and analysis of the scientific and technical literature on the problems of the regularities in the crushing process in cone crushers determined the following areas of research: the dependencies between the granulometric composition of the material and the parameters of the profile of the crushing space; the intensity of the lining armor wear of movable and stationary cones; establishing the optimal profile of the crushing space; minimizing the consumption of high-manganese steel, optimizing the repair and maintenance costs of crushing equipment, etc. The condition of the lining armor is one of the main determining factors in changing the qualitative and quantitative characteristics of the fine crushing process. It is established that a significant number of failures of cone crushers, namely 96 %, lead to unscheduled repairs. The aim of the study is to implement a new approach in monitoring the condition of lining armor. The article uses an integrated approach, which includes scientific analysis and generalization of previously published studies on the subject under consideration. The methodological basis of the research is the theory of fuzzy logic and fuzzy sets, as well as methods of system analysis. The scientific novelty of the work lies in the realization of the possibility of using artificial intelligence methods in assessing the condition of the

lining armor of cone crushers. An approach to the control of the lining armor wear of cone crushers of fine and medium crushing is determined.

Keywords

minerals, crusher, lining armor, wear, artificial intelligence, modeling, neural network

For citation

Velikanov V.S., Derina N.V., Panfilova O.R. Metody iskusstvennogo intellekta v otsenke stepeni iznosa futerovochnoi broni konusnykh drobilok [Artificial intelligence methods in assessing the degree of wear of the lining armor of cone crushers]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 202–211. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).202-211

Article Info

Received: June 7, 2022; revised: June 16, 2022; accepted: June 17, 2022.

Введение

Эксплуатация технологического оборудования в условиях горно-перерабатывающих предприятий осуществляется при воздействии факторов различной природы, обусловленных конструктивными и функциональными особенностями горного оборудования (условиями эксплуатации) и случайными внешними воздействиями, которые приводят к изменениям его технического состояния. К самым характерным следует отнести нагрузки от механического и термического воздействия, параметры прочности материала, геометрические размеры, уровень технического обслуживания, ремонта и др. Эти факторы приводят к постепенному ухудшению технического состояния горного оборудования во времени.

Статистика по вынужденным остановкам дробилок составляет порядка 16–20 % их фонда рабочего времени, простои обусловлены необходимостью замены физически изношенных деталей. Коэффициент использования дробильного оборудования в среднем на отечественных горно-перерабатывающих предприятиях составляет 0,75–0,86 % [1–4].

Исследования показывают, что футеровочные брони дробилок среднего (КСД) и мелкого (КМД) типов дробления являются наименее износостойкими (рис.1). Стоимость этих деталей от общего объема затрат на ремонтно-эксплуатационные нужды составляет 91 % для дробилок типа КСД и 80 % для дробилок типа КМД.



Рис. 1. Характерный износ футеровочной брони дробилок среднего и мелкого типов дробления
Fig. 1. Typical wear of lining armor in medium and fine type crushers

Интенсивное изнашивание футеровочной брони приводит к изменению размеров разгрузочной щели в сторону увеличения, что в конечном итоге приводит к укрупнению дробленого продукта, что отрицательно влияет на качественно-количественные характеристики процесса дробления. Причем футеровочные брони дробилок среднего и мелкого дробления, образующие камеру дробления, изнашиваются неравномерно, что приводит к ускоренному изменению зазоров между дробящими поверхностями по всей глубине камеры дробления [5].

Материалы и методы

Для решения задач прогнозирования технического состояния и оценки остаточного ресурса промышленного оборудования различными исследователями предложено множество моделей, описывающих процесс возникновения отказа оборудования, которые отличаются видом исходной информации, методами ее анализа и формой представления результатов [6, 7]. В соответствии с наиболее общей классификацией их можно разделить на подходы, представленные (табл. 1).

Процессы, происходящие в камере дроб-

Таблица 1. Модели, описывающие процесс возникновения отказов технологического оборудования
Table 1. Models describing the process of technological equipment failures

Модели	Достоинства	Недостатки
На физических моделях (physical-based methods) PhM	<ol style="list-style-type: none"> Использует известные математические модели для описания физических, химических и иных процессов износа конструкций. Процесс основан на отработанной процедуре построения необходимых математических моделей систем. Создание точной физической модели требует глубокого понимания того, как работает конкретная система и механизм отказов 	<ol style="list-style-type: none"> Точность этих моделей сильно зависит от понимания системы [8]. Реализация зачастую невозможна в рамках реального производственного процесса [9]. Использование чисто физических методов оценки остаточного ресурса не позволяет учесть многообразие реальных условий эксплуатации
На использовании формализованных знаний (knowledge-based methods) КВМ	<ol style="list-style-type: none"> Использует опыт и знания экспертов для решения задач поддержки принятия решений [10]. Примеры методов, относящихся к этим классам, являются экспертные системы и системы на основе нечеткой логики [11]. Нечеткая логика как механизм представления знаний широко применяется во многих технических приложениях [12, 13]. Используется несколько «уровней» определенности в дополнение к обычным «истина» и «ложь». Полезны для описания процессов и состояний системы в формате лингвистических переменных, которые по своей сути нечеткие и включают в себя качественные описания числовых значений, значимых для операторов 	<ol style="list-style-type: none"> Экспертные системы не могут принимать правильные решения в ситуациях, не включенных в базу знаний, на которой она была обучена, и получение такой базы знаний само по себе является проблемой. Знания экспертов трудно формализовать, и они зачастую связаны с неопределенностями. Увеличение числа решающих правил приводит к требованиям в плане увеличения вычислительной мощности. Реализация моделей на основе экспертных знаний для сложных систем, определение правильного набора правил и функций отношений является сложным и трудоемким процессом
на анализе данных (data-driven methods) DDM	<ol style="list-style-type: none"> Моделирует поведение исследуемой системы на основе данных, собранных в процессе мониторинга. Обладает наибольшим потенциалом и практической эффективностью, которая продолжает наращиваться на базе использования статистических методов анализа многомерных данных, и методов машинного обучения [14]. Обладает свойствами универсальности, поскольку они абстрагированы от физической природы системы, не требует глубоких априорных знаний ее внутренней структуры и функциональных связей между элементами [6] 	<ol style="list-style-type: none"> Относительно дороги для более сложных инженерных моделей. Необходимо откалибровать с помощью данных на месте. Сами по себе они не очень хороши для оценки побочного эффекта. Предположения должны быть подтверждены исследованиями и другими измеренными данными. Ограниченная применимость

ления, и остаточный ресурс футеровочной брони конусных дробилок достаточно трудно описать и представить с помощью аналитических выражений, так как большинство влияющих факторов носят случайный характер. Поэтому имеется необходимость в новом подходе, учитывающем неопределенный характер взаимодействия дробимого материала с броней подвижного и неподвижного конуса.

Использование формализованных знаний, а именно математического аппарата теории нечеткой логики (НЛ) и нечетких множеств в силу того, что возможности данной теории позволяют преодолевать трудности, связанные с качественным характером, а также неполнотой и расплывчатостью информации, успешно реализовано авторами в разработанной системе снижения рисков отказов при управлении горной машиной [15]. В рамках выполнения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы создана система автоматического управления по контролю величины зазора выходной щели конусной дробилки типа КМД-1750Гр-Д на основе методов нечеткого управления. В качестве регулятора ширины разгрузочной щели применен нечеткий регулятор (НР). На вход НР подается два управляющего

сигнала – состояние футеровочной брони и выход класса крупнее требуемого максимального куска, а на выходе соответственно ширина разгрузочной щели.

В развитии дальнейших исследований за основу принятой методологии выбран оригинальный подход, реализованный коллективом авторов в ряде научно-исследовательских работ, а именно применение методов искусственного интеллекта, в том числе нечетких нейронных сетей (ННС) для решения задач прогнозирования вероятности отказов горного оборудования [16–19]. ННС могут создавать высоко адаптивные нелинейные прогнозные модели, позволяющие во многих случаях моделировать и выполнять прогнозы сложных временных зависимостей с большей эффективностью и точностью по сравнению с известными статистическими методами.

Основная идея, положенная в основу ННС следующая: используется выборка данных для определения параметров функций принадлежности, которые лучше всего соответствуют некоторой системе логического вывода, т. е. выводы делаются на основе аппарата нечеткой логики, а для нахождения параметров функций принадлежности используются алго-



Рис. 2. Структура нечетких нейронных сетей

Fig. 2. Structure of fuzzy neural networks

ритмы обучения нейронных сетей. Такие системы могут использовать заранее известную информацию, обучаться, приобретать новые знания, прогнозировать временные ряды, выполнять классификацию образов и, кроме этого, они являются вполне наглядными для пользователя [19] (рис. 2).

Процесс прогнозирования с помощью нейронных сетей состоит из следующих этапов:

- выбор типа нейронной сети;
- сбор и анализ входных обучающих данных;
- обучение нейронной сети (создание базы правил);
- тестирование на контрольном множестве данных и при необходимости доработка базы.

ННС объединяют достоинства нейронных сетей и систем нечеткого вывода [19].

Полученные результаты и их обсуждение

Развитие теории и практики создания конусных дробилок позволило исследователям установить определенные зависимости в характеристиках конусных дробилок. Размер и форма конуса дробления, количество и характер подаваемого продукта, мощность установленного электродвигателя и другие параметры оборудования – все это учтено в конструкторских решениях современных отечественных дробилок. Помимо конструкции конусных дробилок на показатели их эффективной работы влияет множество разнородных факторов. В общем случае, классификация основных факторов, определяющих эффективность функционирования конусных дробилок, – задача достаточно сложная. Эксплуатация дробилок в условиях горно-перерабатывающих предприятий

определяется не только конструктивными и функциональными особенностями дробилок, но и рядом внешних факторов.

Процесс оценки степени износа футеровочной брони (Det_j) может быть представлен следующей обобщенной информационной структурой:

$$Det_j \langle Ti, Ki, Ci; A \rightarrow B \rangle,$$

где Det_j – возможные состояния футеровочной брони; T_i – множество значений технических факторов; K_i – множество значений внешних факторов; C_i – множество значений текущих характеристик; i – количество элементов каждого фактора; j – количество возможных состояний футеровочной брони; A, B – нечеткие высказывания; $A \rightarrow B$ – нечеткая импликация.

Нейронная сеть состоит из: входного слоя – синапсов, связывающих входы нейрона с ядром; ядра нейрона, которое осуществляет обработку этих сигналов; аксона, который связывает нейрон с нейронами следующего слоя и выходного слоя (рис. 3).

Входным слоем оценки степени износа футеровочной брони являются факторы и текущие характеристики T_i, K_i, C_i (соответственно с предложенным подходом): чем более неопределен фактор, влияющий на степень износа, тем, в конечном итоге, и процесс оценки более нечеткий. Поэтому с использованием основных положений теории НЛ данные должны быть представлены в виде функций принадлежности. Данный этап называется фазификацией. Она представляет собой процедуру нахождения значений функций принадлежности входных лингвистических переменных на основе обычных (не нечетких) исходных данных [20–22]. Для построения модели оценки степени износа футеровочной брони необходи-

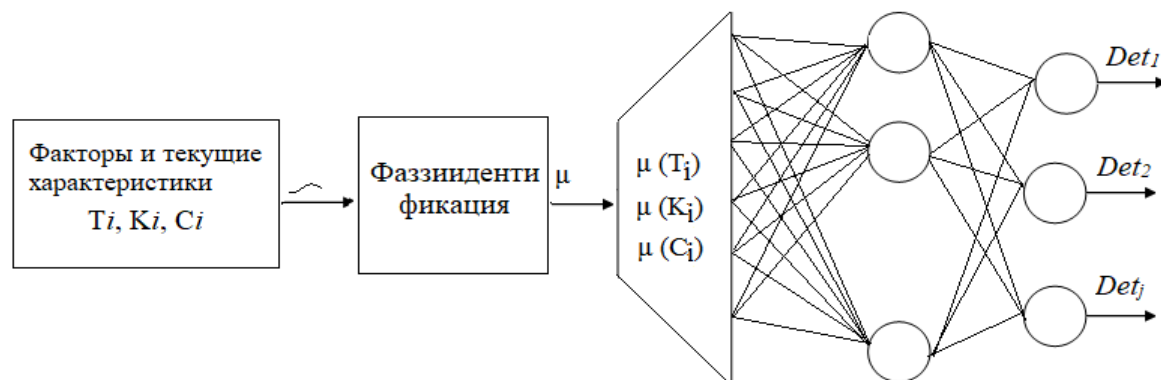


Рис.3. Схема нейронной сети
Fig. 3. Scheme of neural network

мо определить функции принадлежности каждого фактора $\mu(T_i)$, $\mu(K_i)$, и $\mu(C_i)$, а также построить нечеткую базу правил.

Для фаззиидентификации привлекаются эксперты (10 чел., средний опыт работы 27,4 года). Экспертными методами определены терм-множества и функции принадлежности всех лингвистических переменных (табл. 2).

Составление набора правил нечеткого логического вывода осуществляется также с привлечением экспертов. Он реализуется в программном пакете MatLab. Данный пакет является удобным инструментом разработки сложных нейронных систем и предоставляет удобную среду для синтеза нейросетевых методик с прочими методами обработки данных (wavelet-анализ, ста-

Таблица 2. Формализация нечетких лингвистических переменных
Table 2. Formalization of fuzzy linguistic variables

Наименование нечеткой переменной	Область определения	Терм-множества	Область определения терм-множества
<Степень износа брони>, мм	[120;20]	<Нормальная>=Н (состояние футеровочной брони в начальный момент эксплуатации)	[120;80]
		<Удовлетворительная>=У	[85;40]
		<Критическая>=К	[45;20]
<Ширина разгрузочной щели>, мм	[9;20]	<Нормальная>=Н (зазор разгрузочной щели в соответствии с данными каталога продукции производителя дробилок)	[10;12]
		<Увеличенная>=У	[15;20]
		<Критически увеличенная>=КУ	[20;25]
<Выход класса крупнее требуемого максимального куска>, (%)	[0;50]	<Нормальный> (выход плюсового класса)	[0;10]
		<Удовлетворительный>	[5;15]
		<Неудовлетворительный>	[14;50]
<Крепость породы>	[0,3;20]	<Особо крепкая (весьма твердая)>	[18;20]
		<Крепкая (твердая)>	[15;18]
		<Средняя>	[10;15]
<Содержание влаги>, %	[5;100]	<Высокое>	[60;100]
		<Среднее>	[40;60]
		<Низкое>	[5;40]

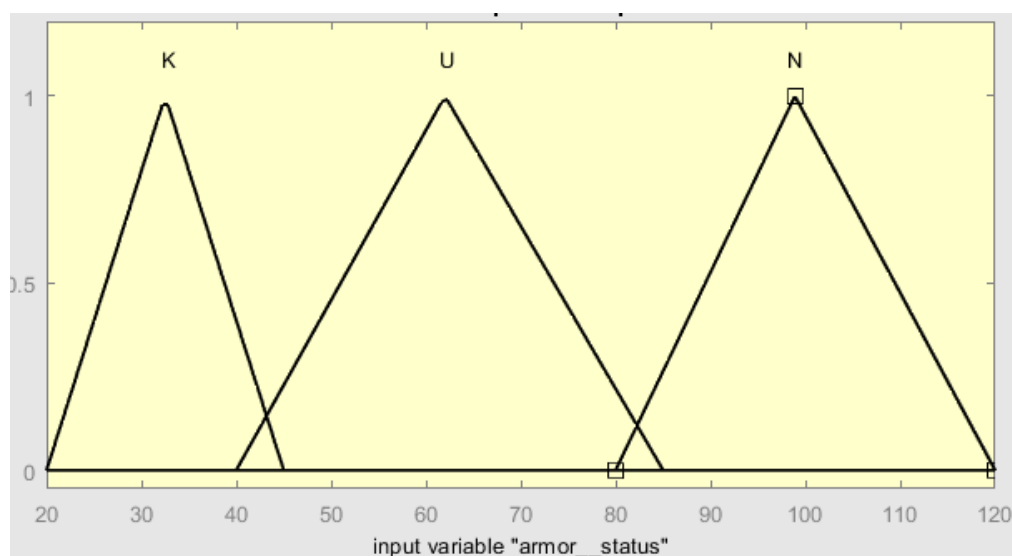


Рис. 4. Состояние футеровочной брони

Fig. 4. Lining armor state

стика, финансовый анализ и т.д.). На рис. 4 и 5 показано графическое представление функций принадлежности входных нечетких переменных с использованием среды MatLab пакет Fuzzy Logic. Разработанные в системе MatLab приложения могут быть затем перетранслированы в C++ [23–27]. В пакете Fuzzy Logic Toolbox системы MatLab гибридные сети реализованы в форме адаптивных систем нейро-нечеткого вывода ANFIS. На рис. 6 представлена архитектура ANFIS-разработанной модели.

Составление правил нечеткого логического вывода осуществляется также с привлечением экспертов. В нашем случае данные правила имеют вид:

– R_1 : если состояние футеровочной брони «N» и выход класса крупнее требуемого макси-

мального куска «N» то ширина разгрузочной щели «N»;

– R_n : если состояние футеровочной брони «S» и выход класса крупнее требуемого максимального куска «N», то ширина разгрузочной щели «enlarged».

Данный редактор позволяет создавать или загружать конкретную модель адаптивной ННС, выполнять ее обучение, визуализировать ее структуру, изменять и настраивать ее параметры, а также использовать настроенную сеть для получения результатов нечеткого вывода. Метод был разработан в начале 1990-х гг. К основному преимуществу метода можно отнести возможность интеграции принципов нейронных сетей с принципами НЛ. Вывод такой системы соответствует набору нечетких

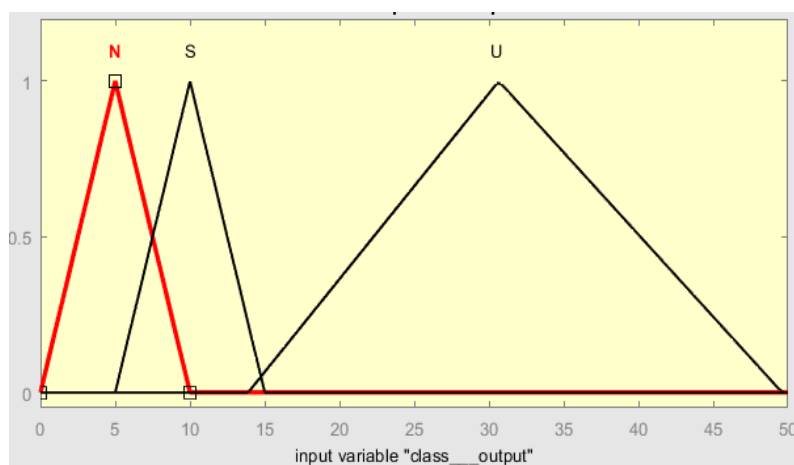


Рис. 5. Терм-множество входных параметров (выход класса крупнее требуемого максимального куска)

Fig. 5. Term set of input parameters (the output of the class is larger than the required maximum chunk)

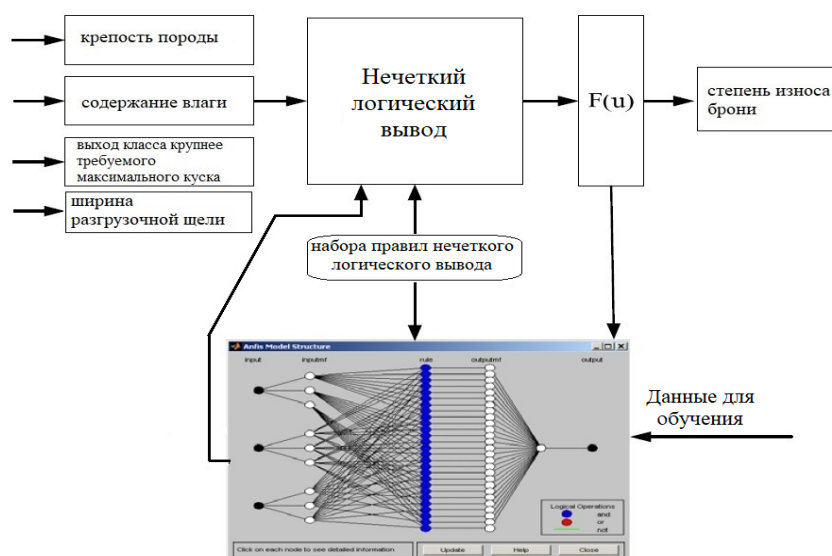


Рис. 6. Архитектура разработанной ANFIS-модели

Fig. 6. Architecture of a designed ANFIS-model

правил «если – то», которые имеют способность к обучению аппроксимированию нелинейных функций. Для наиболее эффективного и оптимального применения ANFIS можно использовать параметры, полученные с помощью генетического алгоритма.

Заключение

В результате анализа последних научно-исследовательских работ и современного состояния дробильного оборудования в условиях отечественных горно-перерабатывающих производств установлено следующее:

1. Для горных предприятий приоритетными направлениями в области модернизации дробильного оборудования относительно конусных дробилок являются установление зави-

симостей между грансоставом материала и параметрами профиля дробящего пространства, а также интенсивность изнашивания футеровочной брони подвижного и неподвижного конуса.

2. В современных системах автоматического управления дробилками отсутствует возможность мониторинга и диагностики состояния футеровочной брони. Вопросы технической реализации данных систем недостаточно рассмотрены и практически не решены.

3. Реализация подходов на основе методов искусственного интеллекта в оценке степени износа футеровочной брони конусных дробилок позволяет воспроизводить сложные зависимости, на основе процессов, происходящих в камере дробления.

Список литературы

1. Гончаров А.Б., Тулинов А.Б., Иванов В.А. Восстановление износа опорной чаши конусной дробилки // Горный информ.-аналит. бюл. 2016. № 9. С. 22–28.
2. Великанов В.С. Гуров М.Ю. Развитие научно-методологических основ совершенствования карьерных экскаваторов на базе нечетко-множественного подхода. Магнитогорск : МаГТУ им. Г.И. Носова, 2018. 217 с.
3. Бойко П.Ф. Оптимизация технического обслуживания и ремонта механического оборудования // Горный журнал. 2011. № 6. С. 52–54.
4. Мнацакян В.У., Бойко П.Ф. Технология восстановления работоспособности эксцентриковых стаканов дробильных агрегатов // Технология машиностроения. 2011. № 2. С. 38–39.
5. Управление обогащением медно-молибденовых руд на основе комплексного радиометрического анализа руды / З. Ганбаатар, Л. Дэлгэрбат, А.М. Дуда и др. // Плаксинские чтения : материалы междунар. конф. Екатеринбург, 2011. С. 118–121.
6. Равин А.А., Хруцкий О.В. Инженерные методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2018. № 1. С. 33–47.
7. Прогнозирование отказов оборудования в условиях малого количества поломок / Н.И. Шаханов, И.А. Варфоломеев, Е.В. Ершов и др. // Вестн. Череповецк. гос. ун-та. 2016. № 6 (75). С. 36–40.
8. Zhang L.A., Li X., Yu. J. A review of fault prognostics in condition based maintenance // Proc. of SPIE. 2006. P. 635–752. DOI: 10.1117/12.717514.
9. Ткаченко М.Г. Прогнозирование оставшегося времени безаварийной работы нефтегазодобывающего оборудования с применением технологии искусственных нейронных сетей // Инженерный вестник Дона : Электрон. науч. журн. 2014. № 4(1). С. 1–11. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2578> (дата обращения 18.02.2022).
10. Elattar H.M., Elminir H.K., Riad A.M. Prognostics: a literature review // Complex & Intelligent Systems. 2016. № 2 (2). P. 125–154. DOI: 10.1007/s40747-016-0019-3.
11. Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities / A. Heng, S. Zhang, A. Tan et al. // Mech. Systems and Signal Processing. 2008. Vol. 23(3). P. 724–739.
12. Шайхутдинов Д. В. Методы мониторинга и диагностики динамических сложных технических систем на базе средств имитационного моделирования // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 11 (1). С. 146–153.
13. Jardine K.S., Daming L., Dragan B. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. № 20(7). P. 1483–1510.
14. Тимофеев А.В., Денисов В.М. Идентификация стадии деградации оборудования в системах сервисного обслуживания превентивного типа // Науч.-техн. вестн. информ. технологий, механики и оптики. 2019. № 6. С. 1095–1104.
15. Великанов В.С. Научные основы системы снижения рисков отказов при управлении карьерным экскаватором : дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2020. 292 с.
16. Мажибрада И.Ю. Использование методов искусственного интеллекта в системах технического обслуживания и ремонта карьерного оборудования // Новая наука: проблемы и перспективы : материалы междунар. науч.-практ. конф. Стерлитамак, 2015. С. 111–115.
17. Мажибрада И.Ю. Экспертный анализ степени влияния факторов на возможность появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора // Горный информ.-аналит.бюл. 2017. № 9. С. 220–225.
18. Мажибрада И.Ю., Баранникова И.В., Бондаренко И.С. Анализ факторов, влияющих на возможность появления категории отказа гидравлической системы одноковшового карьерного гидравлического экскаватора // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики : материалы XIII Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Т. 1. Тула, 2017. С. 162–167.

19. Мажибрада И.Ю. Разработка модели оценки эффективности управления системой технического обслуживания и ремонта одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 129 с.
20. Великанов В.С., Шабанов А.А. Метод анализа иерархий в установлении значений весовых коэффициентов эргономических показателей карьерных экскаваторов // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики : материалы VIII Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Тула, 2012. С. 238–244.
21. Великанов В.С. Разработка алгоритмов нечеткого моделирования для интеллектуальной поддержки принятия решений по определению уровня эргономичности карьерных экскаваторов // Горная промышленность. 2011. № 5 (99). С. 64–68.
22. Великанов В.С. Использование нечеткой логики и теории нечетких множеств для управления эргономическими показателями качества карьерных экскаваторов // Горный информ.-аналит. бюл. 2010. № 9. С. 57–62.
23. Бабокин Г.И., Шпрехер Д.М. Применение нейронных сетей для диагностики электромеханических систем // Горный информ.-аналит. бюл. 2011. № 4. С. 132–139.
24. Bearing fault diagnosis using multi-scale entropy and adaptive neuro-fuzzy inference / L. Zhang, G. Xiong, H. Liu et al. // Expert Systems with Applications. 2010. № 37. P. 6077–6085.
25. Machine health monitoring with LSTM networks / R. Zhao, J. Wang, R. Yan et al. // 10th International Conference on Sensing Technology (ICST). 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICSensT.2016.7796266.
26. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. 2015. Vol. 521. P. 436–444.
27. Созыкин А.В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер.: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т.6. № 3. С. 28–59.

References

1. Goncharov A.B., Tulinov A.B., Ivanov V.A. Vosstanovlenie iznosa opornoj chashi konusnoi drobilki [Restoration of wear of the support bowl of a cone crusher]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], 2016, no. 9, pp. 22–28.
2. Velikanov V.S. Gurov M.Yu. Razvitiye nauchno-metodologicheskikh osnov sovershenstvovaniya kar'ernykh ekskavatorov na baze nechetko-mnozhestvennogo podkhoda [Development of scientific and methodological foundations for the improvement of quarry excavators on the basis of a non-clearly-multiple approach]. Magnitogorsk: MagGTU Publ., 2018. 217 p.
3. Boiko P.F. Optimizatsiya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta mekhanicheskogo oborudovaniya [Optimization of maintenance and repair of mechanical equipment]. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2011, no. 6, pp. 52–54.
4. Mnatsakanyan V.U., Boiko P.F. Tekhnologiya vosstanovleniya rabotosposobnosti eksentrikovykh stakanov drobil'nykh agregatov [Technology of restoring the operability of eccentric cups of crushing units]. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Technology of mechanical engineering], 2011, no. 2, pp. 38–39.
5. Ganbaatar Z., Dalgerbat L., Duda A.M. et al. Upravlenie obogashcheniem medno-molibdenovykh rud na osnove kompleksnogo radiometricheskogo analiza rudy [Controlling of enrichment of copper-molybdenum ores on the basis of complex radiometric analysis of ore]. *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii «Plaksinskie chteniya»* [Proceedings of the international conference «Plaksin readings»]. Ekaterinburg, 2011, pp. 118 – 121.
6. Ravin A.A., Khrutskii O.V. Inzhenernye metody prognozirovaniya ostatochnogo resursa oborudovaniya [Engineering methods for predicting the residual life of equipment]. *Vestnik AGTU. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of the Astrakhan' State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology], 2018, no. 1, pp. 33–47.
7. Shakhanov N.I., Varfolomeev I.A., Ershov E.V., Yudina O.V. Prognozirovaniye otkazov oborudovaniya v usloviyakh malogo kolichestva polomok [Forecasting equipment failures in conditions of a small number of breakdowns]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University], 2016, no. 6(75), pp. 36–40.
8. Zhang L.A., Li X., Yu. J. A review of fault prognostics in condition based maintenance // Proc. of SPIE. 2006. Pp. 635–752. DOI: 10.1117/12.717514.
9. Tkachenko M.G. Prognozirovaniye ostavshegosa vremeni bezavariinoi raboty neftegazodobyvayushchego oborudovaniya s primeneni-em tekhnologii iskusstvennykh neironnykh setei [Forecasting the remaining time of trouble-free operation of oil and gas production equipment with the use of artificial neural network technology]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Inzhenernyi vestnik Dona»* [Electronic scientific journal «Engineering Bulletin of the Don»], 2014, no. 4(1), pp. 1–11.
10. Elattar H.M., Elminir H.K., Riad A.M. Prognostics: a literature review // Complex & Intelligent Systems. 2016. No. 2 (2). Pp. 125–154. DOI: 10.1007/s40747-016-0019-3.
11. Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities / A. Heng, S. Zhang, A. Tan et al. // Mech. Systems and Signal Processing. 2008. Vol. 23(3). Pp. 724–739.
12. Shaikhutdinov D.V. Metody monitoringa i diagnostiki dinamicheskikh slozhnykh tekhnicheskikh sistem na baze sredstv imitatsionno-go modelirovaniya [Methods of monitoring and diagnostics of dynamic complex technical systems based on simulation modeling tools]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies], 2018, no. 11(1), pp. 146–153.
13. Jardine K.S., Daming L., Dragan B.A. review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. No. 20(7). Pp. 1483–1510.
14. Timofeev A.V., Denisov V.M. Identifikatsiya stadii degradatsii oborudovaniya v sistemakh servisnogo obsluzhivaniya preventivnogo tipa [Identification of the stage of equipment degradation in preventive maintenance systems]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2019, no. 6, pp. 1095–1104.

15. Velikanov V.S. Nauchnye osnovy sistemy snizheniya riskov otkazov pri upravlenii kar'ernym ekskavatorom [Scientific foundations of the system for reducing the risks of failures in the management of a quarry excavator]. Doctor's thesis. Ekaterinburg, 2020. 292 p.

16. Mazhibrada I.Yu. Ispol'zovanie metodov iskusstvennogo intellekta v sistemakh tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta kar'erno-go oborudovaniya [The use of artificial intelligence methods in systems of maintenance and repair of quarry equipment]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Novaya nauka: problemy i perspektivy»* [Proceedings of the International scientific and practical conference «New Science: problems and prospects»]. Sterlitamak, 2015, pp. 111–115.

17. Mazhibrada I.Yu. Ekspertnyi analiz stepeni vliyaniya faktorov na vozmozhnost' poyavleniya kategorii otkaza gidravlicheskoi sistemy odnokovshovogo kar'ernogo gidravlicheskogo ekskavatora [Expert analysis of the degree of influence of factors on the possibility of a category of failure of the hydraulic system of a single-bucket open-pit hydraulic excavator]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], 2017, no. 9, pp. 220–225.

18. Mazhibrada I.Yu., Barannikova I.V., Bondarenko I.S. Analiz faktorov, vliyayushchikh na vozmozhnost' poyavleniya kategorii otkaza gidravlicheskoi sistemy odnokovshovogo kar'ernogo gidravlicheskogo ekskavatora [Analysis of factors influencing the possibility of a category of failure of the hydraulic system of a single-bucket hydraulic excavator]. *Materialy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii po problemam gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki «Sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gor-noj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki» (V 2-kh tomakh)* [Proceedings of the XIII International Conference on Problems of Mining, Construction and Energy «Socio-economic and environmental problems of mining, construction and energy» (In 2 vol.)]. Tula, 2017, vol. 1, pp.162–167.

19. Mazhibrada I.Yu. Razrabotka modeli otsenki effektivnosti upravleniya sistemoi tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta odno-kovshovykh kar'ernykh gidravlicheskikh ekskavatorov [Development of a model for evaluating the effectiveness of management of the system of maintenance and repair of single-bucket quarry hydraulic excavators]. Ph. D's thesis. Moscow, 2018. 129 p.

20. Velikanov V.S., Shabanov A.A. Metod analiza ierarkhii v ustanovlenii znachenii vesovykh koeffitsientov ergonomicheskikh pokazatelei kar'ernykh ekskavatorov [Method of hierarchy analysis in determining the values of weight coefficients of ergonomic indicators of quarry excavators]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi konferentsiya po problemam gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki «Sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki»* [Proceedings of the VIII International Conference on problems of mining, construction and energy «Socio-economic and environmental problems of mining, construction and energy»]. Tula, 2012, pp. 238–244.

21. Velikanov V.S. Razrabotka algoritmov nechetkogo modelirovaniya dlya intellektual'noi podderzhki prinyatiya reshenii po opredeleniyu urovnya ergonomichnosti kar'ernykh ekskavatorov [Development of fuzzy modeling algorithms for intellectual decision-making support for determining the level of ergonomics of quarry excavators]. *Gornaya promyshlennost'* [Mining Industry], 2011, no. 5(99), pp. 64–68.

22. Velikanov V.S. Ispol'zovanie nechetkoi logiki i teorii nechetkikh mnozhestv dlya upravleniya ergonomicheskimi pokazatelyami kachestva kar'ernykh ekskavatorov [The use of fuzzy logic and the theory of fuzzy sets for the management of ergonomic quality indicators of quarry excavators]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining information and analytical Bulletin], 2010, no. 9, pp. 57–62.

23. Babokin G.I., Shprekher D.M. Primenenie neironnykh setei dlya diagnostiki elektromekhanicheskikh sistem [Application of neural networks for diagnostics of electromechanical systems]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining information and analytical Bulletin], 2011, no. 4, pp. 132–139.

24. Bearing fault diagnosis using multi-scale entropy and adaptive neuro-fuzzy inference / L. Zhang, G. Xiong, H. Liu et al. // *Expert Systems with Applications*. 2010. No. 37. Pp. 6077–6085.

25. Machine health monitoring with LSTM networks / R. Zhao, J. Wang, R. Yan et al. // *10th International Conference on Sensing Technology (ICST)*. 2016. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICSensT.2016.7796266.

26. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // *Nature*. 2015. Vol. 521. P. 436–444.

27. Sozykin A.V. Obzor metodov obucheniya glubokikh neironnykh setei [Review of deep neural network training methods]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Computer Science], 2017, vol. 6, no. 3, pp. 28–59.

Информация об авторах

Великанов Владимир Семенович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; e-mail: rzhik_00@mail.ru.

Дёрина Наталья Владимировна, канд. филол. наук, доцент кафедры иностранных языков по техническим направлениям, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; e-mail: nataljapidckaluck@yandex.ru.

Панфилова Ольга Рашидовна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; e-mail: halikova@inbox.ru.

Information about the authors

Vladimir S. Velikanov, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Lifting and transport machines and robots, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg; e-mail: rzhik_00@mail.ru.

Natal'ya V. Derina, Ph.D. in Philology, Associate Professor of the Department of Foreign languages in technical areas, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk; e-mail: nataljapidckaluck@yandex.ru.

Ol'ga R. Panfilova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mining machines and transport and technological complexes, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk; e-mail: halikova@inbox.ru.