УДК 658.012.011.56:658.512

Н.В.ДАНИЛОВА, *канд. техн. наук, ассистент, (812) 328-82-56*
Э.Д.КАДЫРОВ, *канд. техн. наук, доцент, (812) 328-82-56*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

N.V.DANILOVA, *PhD in eng. sc., assistant lecturer, (812) 328-82-56*
E.D.KADYROV, *PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-82-56*
Saint Petersburg State Mining University

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЛАВКИ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА В ПЕЧИ ВАНЮКОВА

Разработана методика оценки содержания меди в штейне с использованием теории нечеткой логики. Приведена модификация алгоритмов нечеткой логики – построение базы правил процесса на основе статистических данных работы печи.

***Ключевые слова*:** математическое моделирование, нечеткая логика.

APPLICATION OF FUZZY-LOGIC FOR MODELLING OF PROCESS OF FUSION OF THE MEDNO-NICKEL CONCENTRATE IN FURNACE VANJUKOVA

In work mathematical model of process of fusion of copper-nickel sulphidic raw materials with use of methods of indistinct logic is described. Updating of algorithms fuzzy-logic (formation of base of rules of process on the basis of the statistical data of work of the furnace) is described.

***Key words*:** mathematical modeling, fuzzy-logic.

Процесс плавки медно-никелевого сульфидного сырья относится к многофакторным процессам с большим потоком информации, дискретным запаздывающим контролем состава продуктов плавки и трудно формализуемыми возмущениями (например, по содержаниям основных металлов в шихте). Контролировать эти возмущения не представляется возможным, а стабилизация входных материальных потоков не снимает колебаний свойств шихты и не исключает субъективные ошибки операторов-технологов. Это вызывает необходимость создания новых и модернизации существующих систем управления.

Эффективным вариантом решения актуальной проблемы повышения технико-экономических показателей процесса является создание автоматизированной системы управления технологическим процессом переработки медно-никелевого сульфидного сырья в условиях нехватки информации о ходе процесса на основе математических моделей, построенных с помощью методов нечеткой логики.

Попытки математического описания процесса плавки медно-никелевого сульфидного сырья не дали ожидаемого высокого эффекта при управлении. Эта ситуация соответствует принципу Л.Заде о несовместимости большой сложности и высокой точности математического описания процесса*. Именно в этом случае для характе-

* *Лукас В.А.* Основы фази-управления; Уральская горно-геологическая академия. Екатеринбург, 2000.

Lukas V.A. Fuzzy-logic bases; The Ural mining-geological academy. Ekaterinburg, 2000.

Таблица 1

Основные параметры процесса Ванюкова

Показатель	Переменные					
	Входные					Выходные
	Расход шихты, т/ч	Расход кислорода, $м^3/ч$	Расход воздуха, $м^3/ч$	Расход КВС, $м^3/ч$	Содержание кислорода в КВС, %	Содержание меди в штейне, %
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
Минимальное значение	90	17000	1500	24000	62	47
Максимальное значение	196	31000	11000	33500	96	66,7
Среднее значение	146	25200	4460	29480	86	57,9
Дисперсия	480	9438900	4545750	2888900	59	9,4
Среднее квадратическое отклонение	21,9	3072	2132	1700	7,7	3,0

Таблица 2

Основные параметры процесса Ванюкова, принятые для моделирования

Показатель	Переменные					
	Входные					Выходные
	Расход шихты, т/ч	Расход кислорода, $м^3/ч$	Расход воздуха, $м^3/ч$	Расход КВС, $м^3/ч$	Содержание кислорода в КВС, %	Содержание меди в штейне, %
Минимальное значение	90/95	17000/16000	1500/2000	24000/24500	62/62	47/47,45
Максимальное значение	196/190	31000/30500	11000/10500	33500/33000	96/95	66,7/68,74
Среднее значение	146/148	25200/24900	4460/4490	29480/29200	86/85	57,9/58,7
Дисперсия	480/392	$9{,}4\cdot10^6/8{,}9\cdot10^6$	$4{,}5\cdot10^6/4{,}4\cdot10^6$	$2{,}9\cdot10^6/2{,}4\cdot10^6$	59/60,5	9,4/11,2
Среднее квадратическое отклонение	21,9/19,8	3072/2982	2132/2115	1700/1570	7,7/7,8	3,0/3,3

Примечание. В числителе – обучающая выборка, в знаменателе – тестовая.

ристики состояния объекта целесообразно применение лингвистических оценок, которые имеют довольно размытые границы.

Цель работы – разработка имитационной модели процесса Ванюкова на основе нечеткой логики, которая позволит оценить качество целевого продукта (содержание меди в штейне).

Факторное пространство процесса Ванюкова ограничено пятью переменными (табл.1) из-за технической трудности поиска режимов ведения технологического процесса по сравнению с требуемыми значениями переменных.

Согласно предварительным исследованиям* наибольшее влияние на содержание меди в штейне y оказывают следующие факторы: расход шихты, т/ч; расход технического кислорода, $м^3/ч$; расход воздуха, $м^3/ч$; общий расход кислородно-воздушной смеси (КВС), $м^3/ч$; содержание кислорода в КВС, %.

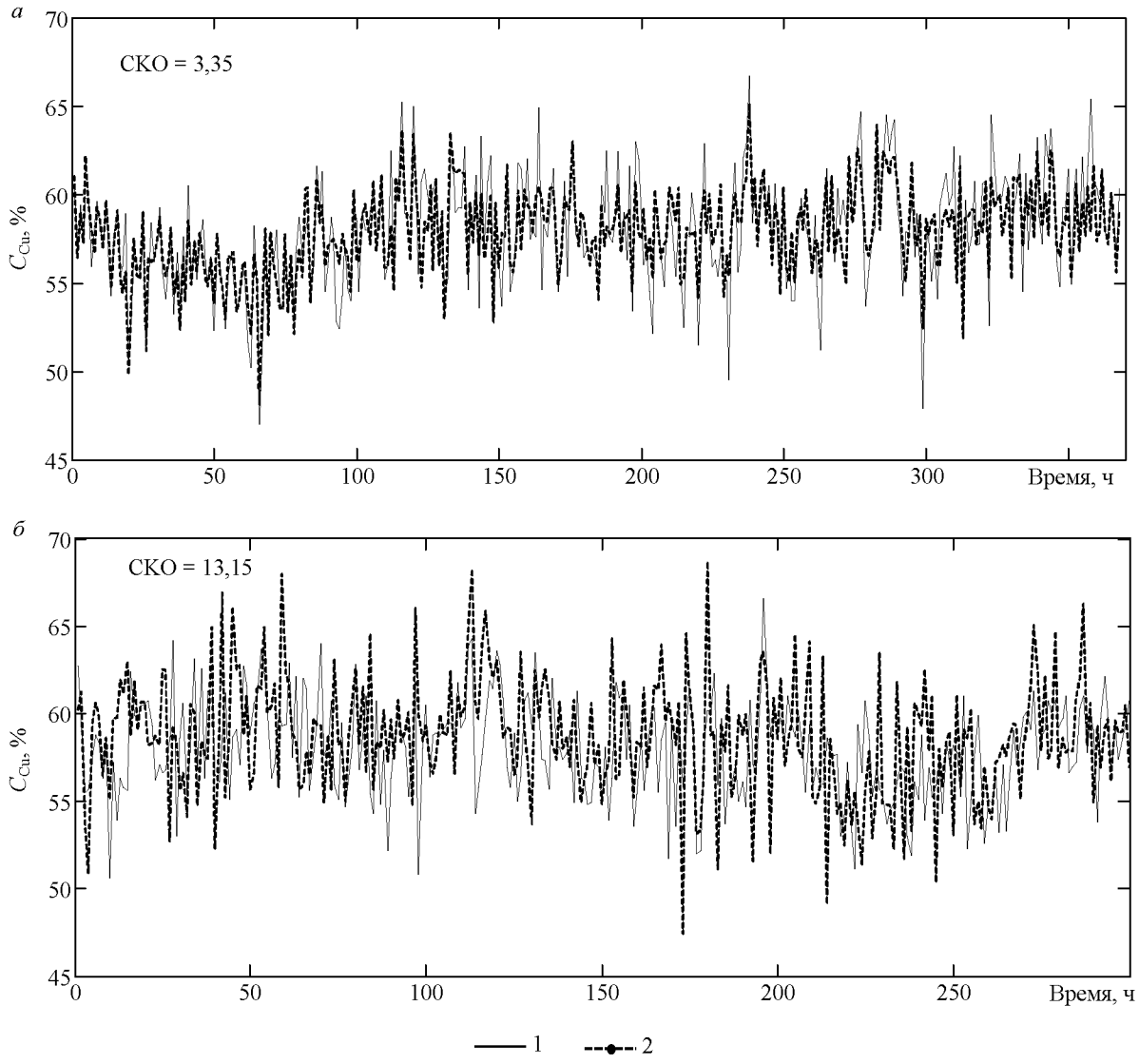
Таким образом, необходимо увязать влияющие на содержание меди в штейне факторы с лингвистическими оценками содержания меди в штейне.

По исходным данным трудно оценить продукционные правила, связывающие входы и выходы. Традиционно базу правил формируют на основе экспертной информации. В данном случае ограничением является использование субъективной информации.

В данной работе предложен новый подход к построению функций принадлежности по экспериментальным данным вход – выход. При этом формируется база продукционных правил, которая минимизирует отклонения между экспериментальными данными и результатами нечеткого моделиро-

* *Кадыров Э.Д.* Оценка технологических параметров автогенных процессов / Э.Д.Кадыров, Н.В.Данилова // Автоматизация в промышленности. 2008. № 5.

Kadyrov E.D., Danilova N.V. Estimation of technological parameters of autogenous processes // Automation in the industry. 2008. N 5.



Результат работы программы на обучающей (*а*) и тестовой (*б*) выборке
1 – фактические значения; 2 – результаты моделирования

вания. Использование такого подхода снимает субъективизм формирования базы правил, однако требует обучающей выборки.

Таким образом, решение задачи сводится к разработке программы для генерации базы продукционных правил непосредственно из обучающей выборки. Методика разработки базы правил заключается в нечетком логическом выводе значения содержания меди в штейне при различных комбинациях независимых переменных (x_1, x_2, x_3, x_4 и x_5) на массиве исторических данных оперативного контроля за процессом Ванюкова.

Нечеткий логический вывод – это аппроксимация зависимости вход – выход на основе лингвистических высказываний типа «ЕСЛИ – ТО» и операций над нечеткими множествами. Основные положения теории нечетких множеств, используемые в настоящей статье, приведены в работе В.А.Лукас.

Для решения поставленной задачи было сформировано две выборки (табл.2): обучающая (370 случаев) и тестовая (300 случаев).

Для обучения системы с применением алгоритмов нечеткой логики воспользуемся пакетом Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB для идентификации нелинейных

зависимостей с помощью нечеткого логического вывода. В пакете Fuzzy Logic Toolbox формирование нечеткого вывода по алгоритму Сугено реализовано функцией genfis2. Эта функция генерирует систему нечеткого логического вывода типа Сугено из данных с использованием субтрактивной кластеризации. Формирование базы правил в функции genfis2 происходит в два этапа. Сначала определяется количество правил, затем с помощью метода наименьших квадратов – логический вывод каждого правила. В результате получается система нечеткого логического вывода с базой правил, покрывающих всю область факторного пространства (см. рисунок, *а*).

Для проверки адекватности разработанной базы правил проверим ее работу на тестовой выборке (см. рисунок, *б*).

Анализ полученных результатов показывает, что среднее квадратическое отклонение (СКО) рассчитанного содержания меди в штейне от фактического наблюдается в рамках допустимых производственных погрешностей. Для увеличения точности модели необходимо ее оптимизировать. Это реализуется ее дообучением, уточнением продукционных правил.

Таким образом, изложенная методика формирования правил оценки содержания меди в штейне позволяет наметить переход от лингвистических оценок к численным.

Проведенные исследования подтверждают, что данные оперативного контроля служат неиссякаемым источником различных гипотез, отражающих определенные тенденции производственной практики. Вполне состоятельной оказалась гипотеза формирования базы продукционных правил по выборке довольно большого объема.

Разработана методика оценки содержания меди в штейне с использованием теории нечеткой логики. Показано, что содержание меди в штейне может быть найдено с использованием базы продукционных правил, причем исходной посылкой к присвоению содержания меди в штейне той или иной оценки является совокупность значений пяти параметров: расходов шихты, технического кислорода, воздуха, общего расхода КВС и содержания кислорода в КВС. Погрешность работы модели укладывается в производственные рамки допустимых отклонений.