

А. В. СПЕСИВЦЕВ  
СПИИРАН, Санкт-Петербург

И. Т. КИМЯЕВ  
СИБИНТЕК, ООО ИК, Москва

Н. Г. ДОМШЕНКО  
СПбГУ, Санкт-Петербург

## УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКО-ВОЗМОЖНОСТНОЙ МОДЕЛИ

*Исследование посвящено разработке критерия степени согласованности реального и модельного управления сложным технологическим процессом применительно к цветной металлургии. Критерий сформирован с использованием нечетко-возможностной модели, построенной на основе явных и неявных экспертных знаний.*

**Введение.** Полезность нечетко-возможностного моделирования при оценивании степени согласованности исследуемого технологического процесса, реализуемого в рамках конкретного сложного объекта (СЛО) и требуемого уровня его формализации и последующей автоматизации, состоит в том, что, с одной стороны, при таком оценивании учитывается в целом реально существующая неопределенность, связанная с созданием и применением СЛО, а с другой, – сам процесс приобретает черты процесса функционирования киберфизической системы (КФС).

Применительно к пирометаллургическому процессу переработки сульфидных медно-никелевых руд в печах Ванюкова (ПВ), как было показано в предыдущих исследованиях [1, 2], каждая смена ведет процесс по-своему, опираясь исключительно на собственный опыт.

Однако, несмотря на явно наблюдаемые различия в практике управления загрузкой, среднесменные показатели во всех сменах практически одинаковы. При этом понятие «качество ведения процесса» отсутствует как таковое. Из этого факта вытекают, по крайней мере, две важные задачи: поиск эффективных показателей, численно характеризующих меру воздействия оператора на процесс, и формирование критерия оценки качества управления процессом технологическим персоналом.

Целью данного исследования является разработка критерия оценивания степени согласованности технологического процесса, связанного с функционированием СЛО и его нечетко-возможностной модели, построенной на явных и неявных знаниях экспертов [1, 3].

Построение нечетко-возможностной модели [1, 3] на первом этапе работы с экспертом предусматривает выбор наиболее значимых переменных и на этой основе формирование факторного пространства (ФП), в котором предполагается решение задачи.

Для оценивания степени согласованности ПВ с соответствующей моделью экспертом были выбраны следующие переменные:

$X_1$  – загрузка металлосодержащих, т/ч;

$X_2$  – загрузка флюсов, т/ч;

$X_3$  – расход кислорода, м<sup>3</sup>/ч;

$X_5$  – расход природного газа, м<sup>3</sup>/ч;

$X_6$  – расход угля, т/ч;

$X_{23}$  – отклонение содержания меди в штейне от заданного, безразмерная величина (б/р);

$X_{24}$  – отклонение содержания меди в шлаке от заданного в сторону увеличения, б/р;

$Y_{19}$  – степень согласованности, б/р.

Применив ранее разработанную методику [3] удалось построить следующую полиномиальную модель:

$$Y_{19} = 0,52617 + 0,05742x_1 - 0,0293x_{23} - 0,09258x_{24} + 0,0293x_6 + 0,05273x_1x_5 + 0,03164x_2x_5 + 0,03164x_3x_5 + 0,04102x_3x_6 + 0,0293x_{23}x_{24} + 0,0293x_1x_5x_{24} + 0,02461x_2x_3x_{24} + 0,02695x_2x_{23}x_{24}, \quad (1)$$

где все переменные представлены в стандартизованном масштабе. В (1) оставлены без изменения обозначения переменных, предложенные в предыдущих работах [2, 4].

Оценивание значимых коэффициентов в (1) выявило даже тройные взаимодействия. Это подчеркивает сложность технологического процесса, где в турбулентной ванне взаимодействуют физико-химические, тепловые, массообменные и гидроаэродинамические процессы.

Таким образом, рассчитываемая по формуле (1) переменная «степень согласованности» приобретает свойства существенного критерия в управлении технологическими процессами. При этом технологическая функция управления заключается в обеспечении устойчивости протекания физико-химических процессов в реакционной и отстойной зонах ПВ. Поскольку же инерционность по содержанию основных компонентов в шихте достаточно велика, то период квантования в рамках проводимых исследований был выбран достаточно большим и равным двум часам.

В настоящее время на разработанном на основе моделей вида (1) программно-математическом обеспечении интеллектуальной АСУ (ИАСУ) ПВ на основе исходной информации, получаемой от АСУ ПВ и других информационных систем, *в режиме реального времени* проводятся расчеты текущего состояния процесса, анализируется наличие технологического дисбаланса (конфликта) и в случае идентификации конфликтных ситуаций оператору сообщаются предложения по сценариям разрешения конфликта. Предлагаемая ИАСУ ПВ выступает, таким образом, в роли «советчика оператору» и визуализирует информационные каналы, которые отображают для пользователя критерии степени сбалансированности технологического процесса, в основу которых положена нечетко-возможностная модель вида (1).

В разработанной ИАСУ ПВ ситуационно используется более 10 нечетких моделей, описывающих технологический процесс разделительного плавления шихт в печи Ванюкова, построенных на основе более 20 лингвистических переменных, а также аналитические локальные модели работы по всей цепочке вспомогательных механизмов, обеспечивающих функционирование процесса Ванюкова в целом. Построенная таким образом «виртуальная печь» Ванюкова и работающая на той же информационной основе, что и промышленный образец, позволяет получать адекватные расчеты как по ведению процесса плавки, так и по качеству конечных продуктов плавки.

#### **Заключение.**

1. Предложенный критерий степени согласованности реально протекающего технологического процесса и соответствующей моделью, его описывающей, является наиболее информативным по сравнению с ранее предложенными критериями
2. В разработанной нечетко-возможностной модели удалось в явном виде связать управляющие и управляемые переменные, что позволяет ее рассматривать в качестве эффективного инструмента интерактивного управления сложным технологическим процессом с использованием АРМ оператора.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. **Спесивцев А.В.** *Металлургический процесс как объект изучения: новые концепции, системность, практика.* СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 307 с.
2. **Спесивцев А.В., Дайманд И.Н., Лазарев В.И., Кашук А.П.** *Интеллектуальная автоматизированная система управления процессом плавки ПВ-3 Медного завода ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» // Известия вузов. Цветная металлургия, 2014. №5. С. 64-69.*
3. **Игнатъев М.Б., Марлей В.Е., Михайлов В.В., Спесивцев А.В.** *Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний.* СПб: Политех-пресс, 2018. 430 с.
4. Патент РФ № 2 571 968. *Способ автоматического управления процессом плавки медно-никелевого сульфидного сырья в печи Ванюкова при переработке сульфидной шихты на штейн / Орешкин С.А., Спесивцев А.В., Лазарев В.И., Козловский В.Г., Кашук А.П. Оpubл. Бюл. № 36 от 27.12.2015.*

A.V. Spesivtsev (St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg), I.T. Kimyaev (SIBINTEK IC LLC, Moscow), N.G. Domshenko (St. Petersburg University, Saint Petersburg)

#### **Control of a Complex Technological Process Based on a Fuzzy-Possible Model**

The study is devoted to the development of a criterion for the degree of consistency of real and model control of a complex technological process as applied to non-ferrous metallurgy. The criterion was formed using a fuzzy-possibility model built on the basis of explicit and implicit expert knowledge.