УДК 658.012.011.56:658.512

А.В.СПЕСИВЦЕВ, *канд. техн. наук, доцент, ведущий специалист, sav2050@gmail.com*
ЗАО «Технолинк», Санкт-Петербург
И.И.БЕЛОГЛАЗОВ, *аспирант, filosofem@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет
И.Т.КИМЯЕВ, *канд. техн. наук, руководитель проектов*
ООО «Микротест», Москва

A.V.SPESIVTSEV, *PhD in eng. sc., associate professor, leading expert, sav2050@gmail.com*
«Technolink» Co, Saint Petersburg
I.I.BELOGLAZOV, *post-graduate student, filosofem@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining University
I.T.KIMYAEV, *PhD in eng. sc., head of project*
«Microtest» Co, Moscow

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПЕЧЬЮ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Одной из основных проблем моделирования пирометаллургических процессов вообще и обжига в кипящем слое в частности является выбор оптимальной совокупности определяющих факторов функционирования объекта.

Общей тенденцией в эксплуатации и управлении сложными объектами является выработка и принятие решения исключительно человеком. При этом правильность принятия решения во многом зависит от адекватной диагностики технического состояния объекта. Таким образом, возможность эксплуатации объекта полностью определяется и его техническим состоянием на данный момент времени, и правильностью принятия решения экспертом.

***Ключевые слова*:** информационный канал, обжиг в кипящем слое, моделирование, пирометаллургический процесс.

STUDY OF INFORMATION CHANNELS CHARACTERISTICS IN CONTROL FLUID BED FURNACE

One of the main problems of modeling of pyrometallurgical processes and roasting in a fluidized bed is the optimal choice of defining aggregate factors of the object.

The general trend in the use and management of complex objects is the development and adoption of solutions exclusively human. In this case the correctness of the decision depends on an adequate diagnosis of the technical state of the object. Thus, the ability to operate the facility is completely determined by its technical state at any given time, and accuracy of decision-making expert.

***Key words*:** information channel, fluid bed roasting, modeling, pyrometallurgical process.

Введение. Одной из основных проблем моделирования пирометаллургических процессов вообще и обжига в кипящем слое в частности является выбор оптимальной совокупности определяющих факторов функционирования объекта.

Строго обоснованного алгоритма выбора самих факторов и их количества не существует. Все зависит от решаемой задачи и предпочтений исследователя, его знаний и опыта. Сформулируем некоторые общенаучные требования для обеспечения адекватности модели [1]:

• достаточность факторов;

• системность в описании объекта моделирования;

• измеряемость (количественная и (или) вербальная);

• понятный физический смысл и т.д.

В конкретных условиях задачи системность выбора переменных зависит от факторного пространства, которое должно включать переменные, характеризующие назначение и текущее состояние объекта, внешние контролируемые (температура в реакционной зоне, подача шихтовых материалов) и неконтролируемые (содержание серы в шихтовых материалах) действующие факторы.

Поскольку количество входных переменных, которыми может оперировать оператор-технолог, ограничено, то они по возможности должны быть «очень емкими», т.е. обобщенными. Понятие обобщенности переменной довольно субъективно и зависит, на наш взгляд, в первую очередь от уровня принимаемых решений, поскольку для рядового оператора и лица, принимающего решения высокого уровня, например технолога цеха, степень обобщенности одной и той же информации о протекании процесса существенно различна.

Общей тенденцией в эксплуатации и управлении сложными объектами является выработка и принятие решения исключительно человеком. При этом правильность принятия решения во многом зависит от адекватной диагностики технического состояния объекта. Таким образом, возможность эксплуатации объекта полностью определяется и его техническим состоянием на данный момент времени, и правильно принятым решением эксперта.

Математическую модель объекта априорно можно представить некоторой функцией или системой уравнений в выбранном многомерном факторном пространстве. Конкретные значения управляющих воздействий на объект вычисляются только после определения количественных значений входящих в него факторов. Пока такая ситуация не наступила, можно говорить только о прогностических свойствах этой модели при условии ее адекватности изучаемому явлению [2].

Таким образом, управляющее воздействие как координата точки в многомерном факторном пространстве вырабатывается по состоянию в данный конкретный момент и не зависит от траектории (предыстории) достижения этого состояния.

Поэтому при разработке моделей поведения объектов необходимо учитывать их общие особенности [2, 3]: высокий уровень сложности; многофакторность; особенности эксплуатации; ограниченный, как правило, объем формализованных знаний о взаимодействии переменных.

Цель статьи – изучение характеристик информационных каналов при управлении пирометаллургическим процессом как предварительного и важного этапа построения математической модели управления.

Факторы управления и их информационные каналы. Методом интервью с выступающими в роли экспертов операторами-технологами были выявлены факторы, учитываемые ими при управлении процессом в режиме реального времени. Следует отметить, что факторное пространство содержит не только количественные, но и качественные (неколичественные) переменные.

Охарактеризуем детально входные факторы.

• Скорость загрузки концентрата текущая, т/ч. Измеряется с помощью тензометрических весов 0-50 т/ч. При стабильной скорости подачи количество загружаемого за некий период времени концентрата определяется просто.

Управление загрузкой осуществляют путем изменения напряжения на двигателе тарельчатого питателя концентрата в диапазоне 0-250 В. Предусмотрено также дискретное управление исполнительным механизмом загрузки в режиме вкл./откл.

Измерительный контур скорости массопотока концентрата характеризуется неформализуемыми случайными возмущениями, например, налипанием концентрата на ленту конвейера, под которым установлен весовой тензометрический датчик.

• Скорость загрузки оборотной пыли текущая, т/ч. Судить о ее величине можно лишь косвенно путем измерения напряжения на двигателе тарельчатого питателя в диапазоне 0-250 В.

Количественные оценки загрузки пыли отягчены ошибками более высокими, чем при измерении концентрата.

• Температура в слое, °С (0-1500 °С).

Измерения проводят, как правило, в двух точках около стенки печи кипящего слоя (КС). Два регистрирующих прибора типа КСУ отслеживают параметр как непрерывно (но только в одной точке), так и дискретно, примерно через 2,5 мин (после всех 12 точек многоточечного показывающего прибора). Возникающая при этом задержка в показаниях прибора измеренной температуры, по оценке операторов-технологов, приемлема для оперативного управления процессом.

Поскольку температурный режим существенным образом влияет на основные технологические параметры процесса обжига и определяет не только количественные и качественные показатели процесса, но и устойчивость кипящего слоя, поддержание его на заданном уровне в регламентируемом технологической инструкцией диапазоне является одной из основных задач управления процессом обжига.

• Динамика и направление изменения температуры (градиент), °С/мин. Определяют по тем же приборам КСУ. Выбор представительных величин данного параметра зависит от квалификационного уровня оператора.

• Пульсация давления в рабочей камере, мм вод.ст. Измерение непрерывное. Отслеживают органолептически (визуально) амплитуду колебаний и направление изменения общего давления в рабочей камере. В нормальном режиме работы печи КС расход воздуха и его давление поддерживают постоянным. Увеличение амплитуды колебаний (x_5) наблюдают на фоне некоторого среднего уровня при нормальном протекании процесса. Переменная несет в себе неколичественный смысл, так как учитываются только резкое отклонение от нормального протекания процесса в ту или иную сторону и наличие пиков на диаграмме давлений.

• Время предыстории, т.е. время наблюдения после принятия предыдущего управляющего воздействия, мин. Этот параметр отражает как физическое положение процесса в пространстве состояний, так и градиент его движения. Учитывает поведение температуры, служит для формирования стратегии последующего выбора режима управления печью КС. От величины этого параметра зависит, будет ли процесс переведен на новый режим, или останется на прежнем. Служит косвенным критерием физико-химического состояния кипящего слоя. По температуре можно судить о наличии или отсутствии в печи «горючего», а по ее градиенту – о стадии протекания процесса (стадия «прожарки», малая загрузка сульфидного никелевого концентрата и т.д.). Носит в количественном смысле неформализованный характер и учитывается при выработке управляющего воздействия. Зависит от индивидуального почерка ведения процесса и уровня квалификации оператора-обжигальщика.

В качестве выходных факторов обычно выбирают основные управляющие воздействия на процесс обжига в печи КС: величины уставок скоростей загрузки сульфидного никелевого концентрата и оборотной пыли.

Уставки скоростей с входными переменными скоростей загрузки концентрата и пыли имеют тот же смысл, наименования и точность измерения, однако они распределены во времени.

Выбор уставок скоростей загрузки сульфидного никелевого концентрата и оборотной пыли в качестве управляющих переменных обусловливает в полном объеме управление процессом обжига, включая и его производительность. С одной стороны, при постоянном расходе воздуха величины этих переменных и их соотношение полностью определяют ход процесса окислительного обжига, поскольку они формируют материальный и тепловой балансы работы агрегата, а с другой – определяют напряженность теплового режима печи КС, совокуп-

ным отражением которого является температура кипящего слоя, от величины которой, в свою очередь, напрямую зависит производительность объекта управления в целом.

Оценка интервала квантования и погрешностей информационных каналов. Для построения управляющей модели процесса обязательное условие – ошибки определения переменных должны быть известны заранее. Это значит, что измерения и управляющие воздействия, не разделенные доверительным интервалом, принимаются как одно с параллельными замерами. Кроме того, при выборе уровня квантования (дискретизации) непрерывного процесса ошибки определения переменных играют решающую роль, так как уровень квантования измеряемой переменной всегда должен быть возможно больше ошибки ее измерения.

К сожалению, на практике погрешности измерения переменных не формализованы, поэтому возникает задача их оценки хотя бы приближенно.

Приведем три независимых способа оценки интервалов нечувствительности процесса, полученные при его рассмотрении с трех различных точек зрения [1].

Первый способ. Основан на данных при расчетах материального и теплового балансов объекта, которые позволяют оценить верхнюю границу точности изменения переменных, поскольку учитывают лишь некоторые, доступные для вычислений, возмущающие воздействия в рассмотренных информационных каналах.

Количественные значения погрешностей информационных каналов, полученные при расчете материальных и тепловых затрат во время окислительного обжига в печи КС, следующие:

• измерение температуры имеет относительную ошибку ±3,75 % или ±45 °С. Если считать, что ошибка приведена с учетом 3-сигмового интервала, то при доверительной вероятности 0,95 она составит ±30 °С;

• измерение скорости массопотока (концентрата и пыли), проведенное по стандартной методике расчета ошибки средств измерения, ±1,7 % или ±0,20 т/ч.

Количественные значения погрешности измерения скорости массопотока, полученные на основе паспортных данных штатных средств измерения, составляют ±0,17 т/ч, что достаточно близко к рассчитанным по порогу нечувствительности (±0,20 т/ч). Это значит, что принятые ограничения и допущения достаточно адекватны.

Второй способ. Время нечувствительности печи КС по загрузке, рассчитанное на основе материальных и энергетических затрат в объеме печи КС, не менее 5,6 мин. Поэтому время квантования непрерывного процесса обжига в печи должно быть больше этого показателя. Таким образом, при выработке управляющего воздействия важно учитывать именно такой период «невмешательства» в процесс управления обжигом.

Таким образом, приведенные выше данные можно считать статистически (и практически) неразличимыми значениями по скорости массопотока ±0,17 т/ч, измерению температуры ±25 °С, по временной «нечувствительности» печи КС ≥ 5,6 мин.

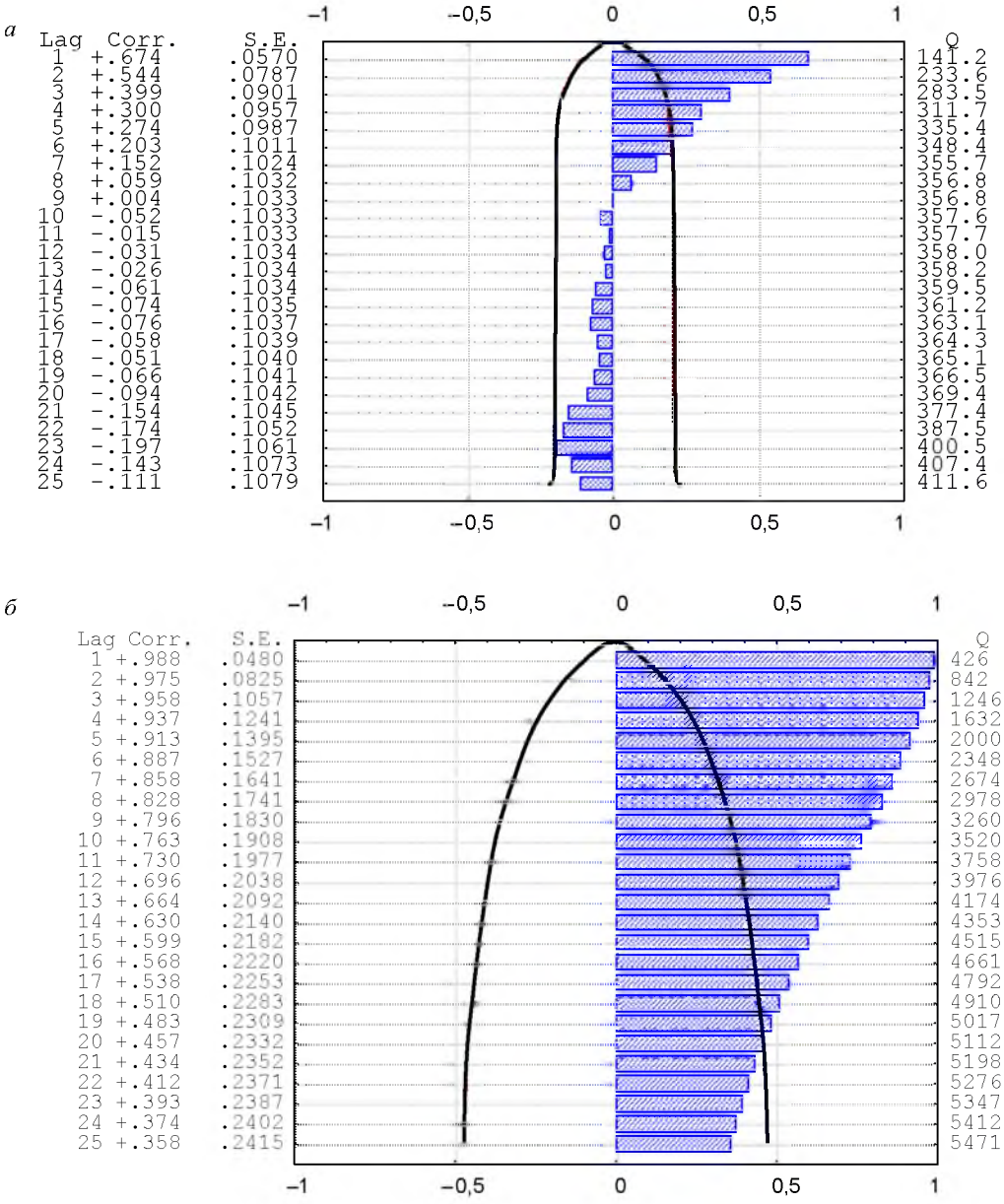
Третий способ. Объективным методом оценки интервала некоррелированности двух распределенных во времени значений переменных является автокорреляционная функция.

Если значения измеряемых входных и выходных параметров рассматривать как случайный процесс, развивающийся во времени, то незначимая величина автокорреляционной функции

$$R_x(\tau)=\frac{1}{T}\int_0^T x(t)x(t+\tau)dt,$$

где τ – варьируемый сдвиг между мгновенными значениями сигнала x определяет временной интервал квантования исследуемой переменной [1].

На основе сбора информации [3] о работе печи КС за длительный период времени (смена) с интервалом 1 мин были построены автокорреляционные функции для скорости загрузки сырья (концентрата) и



Автокорреляционная функция скорости загрузки концентрата (*а*) и температуры в КС (*б*) в реакционной зоне печи КС

температуры в кипящем слое (см. рисунок). Согласно графикам корреляция удаленных друг от друга значений становится неразличимой на фоне ошибки своего определения при достижении по загрузке примерно 6-7 мин, а по температуре в кипящем слое – 19 мин. Это говорит о том, что система «помнит свое прошлое» именно в такие интервалы времени. Иными словами, проведена оценка инерционности системы по этим основным управляющим переменным.

Таким образом, полученные различными способами оценки погрешностей практически совпадают. Этот факт указывает на достоверность проведенных исследований и хорошо согласуется с практикой ведения обжига: в условиях неопределенности оператор-технолог полностью прекращает загрузку материалов в печь для полного выжигания находящегося в ней «горючего» (режим «прожарки»). Продолжительность этого периода составляет не менее 15-20 мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кимяев И.Т.* Интеллектуальная система управления процессом обжига сульфидного никелевого концентрата в кипящем слое: Автореф. дис… канд. техн. наук. МИСиС. М., 2001.

2. *Миронов А.Н.* Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. М., 2000.

3. *Спесивцев А.В.* Металлургический процесс как объект изучения: новые концепции, системность, практика. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004.

REFERENCES

1. *Kimyaev I.T.* Intelligent control system firing process sulphide nickel concentrate in fluidized bed: Thesis PhD. tech. Science. MISA. Moscow, 2001.

2. *Mironov A.N.* The theoretical foundations and methods of forecasting durability of the multimodal complex military-technical systems for space purposes. Moscow, 2000.

3. Spesivtsev A.V. Metallurgical process as an object of study: new concepts, system, practice. Saint Petersburg: Polytechnic Press, 2004.