

ботки информации: науч.-техн. сб. НПО «Аврора». СПб., 2001. С. 129–139.

4. Губанов Ю. А., Леута А. А. Программно-физическое моделирование: основа новой технологии проектирования систем управления судовыми электроэнергетическими системами (ЭЭС) // Сб. докл. на Шестой междунар. конф. «НЕВА-2001». Секция D: Энергетические установки для судов и морских сооружений. СПб., 2001. С. 78–79.

5. Губанов Ю. А., Леута А. А. Методы и средства моделирования для имитации физических параметров корабельных ЭЭС в испытательных и тренажерных комплексах // II Междунар. конф. «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях» NSN`2001. СПбНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2001. С. 127–130.

6. Губанов Ю. А., Ефимова М. И., Леута А. А. Технология программно-физического моделирования корабельных электроэнергетических систем в процессе управления. Modelling and Analysis of safety and Risk in Complex Systems / Proc. of the Second Intern. Scientific School MA SR – 2002. Saint Petersburg, 2002. P. 312–314.

7. Токарев Л. Н. Системы автоматического регулирования. Примеры схем и структур, статические и динамические характеристики, математические модели, элементы теории регулирования. СПб.: НОТАБЕНЕ, 2001. 191 с.

8. Леута А. А., Нгуен Ч. Ч., Нгуен М. Д. Математическая модель компонентов судовых электроэнергетических систем как составная часть технологии испытаний систем автоматического управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. № 2. С. 25–30.

9. Леута А. А., Нгуен Ч. Ч., Нгуен М. Д. Комплект математических моделей компонентов судовых электроэнергетических систем как средство наладки и испытаний аппаратуры автоматического и автоматизированного управления // Молодой ученый. Сер. Техн. науки. 2011. Т. 1, № 7 (30). С. 32–37.

10. Леута А. А., Кузнецов М. А., Нгуен Ч. Ч. Опыт разработки электропривода // Сб. докл. VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 / Мордовский ун-т. Саранск, 2014. С. 88–92.

A. A. Leuta, Ch. Ch. Nguyen

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

SETTING AND TESTING AUTOMATIC EQUIPMENT OF THE SHIP'S ELECTRIC POWER OBJECTS

Need of development and implementation of technology of program and physical modeling on the basis of static converters ensures increase in efficiency and safety of equipment's setting and testing of the ship electro-automatic and automated management systems. The main stages and results of this technology's development, which contributes automation, and also resource-and energy saving in preparation and putting into operation of the ship power objects are considered.

Ship's electric power, automation, technology of equipment's setting and testing, mathematical and programm-physical modeling, multiparametric optimization of setting of automatic regulation and control systems, rotating and static converters

УДК 681.5

И. И. Суляев, Д. Х. Имаев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Моделирование медеплавильной печи как объекта управления температурой расплава

Рассматривается задача разработки математической модели процесса плавления медно-никелевого сырья в печи Ванюкова как объекта управления температурой расплава. Проведен системный анализ объекта, систематизирована априорная информация о процессе и выбран технологический режим, для которого предложена структура линейной динамической модели. Представлены результаты компьютерной имитации системы стабилизации температуры расплава и методика активной идентификации металлургической печи.

Печь Ванюкова, температура расплава, управление, декомпозиция, режим, модель динамики

Целью управления печью Ванюкова (ПВ) для плавления медно-никелевых руд является стабилизация технологических переменных: уровня, плот-

ности и температуры расплава в шахте печи [1]–[4]. Стабилизация достигается согласованным изменением подачи шихты, окислительного дутья (техно-

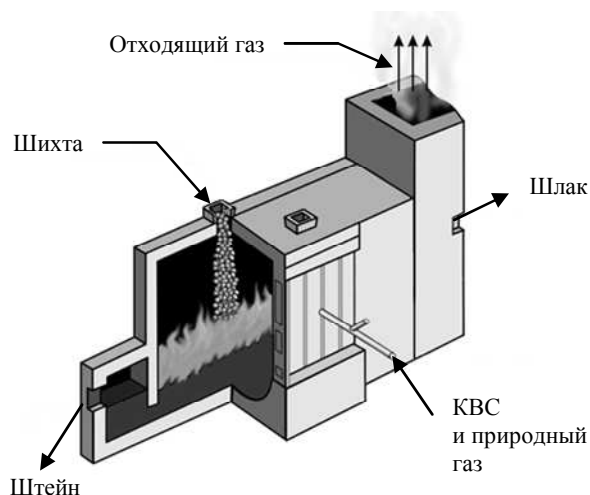


Рис. 1

логический кислород, воздух, природный газ) и непрерывным выпуском продуктов плавки (рис. 1).

Расплав неоднороден по высоте ванны – верхний слой образует шлак, нижний – штейн, которые имеют разные температуры. Поддержание заданных температур (штейн – 1250 °С, шлак – 1300 °С) способствует эффективному разделению продуктов плавки в реакционной зоне печи, уменьшению растворенных и механических потерь цветных металлов со шлаками, повышению производительности ПВ. Из-за высокой агрессивности среды значение температуры расплава определяется косвенно по температуре воды θ на сливе с прикладных кессонов горна [3]. Температурный режим характеризуется суммарным теплосъемом $\Delta\theta_{\text{пр}}q_{\text{пр}} + \Delta\theta_{\text{л}}q_{\text{л}}$, где

$\Delta\theta_{\text{пр}}$ и $\Delta\theta_{\text{л}}$ – разница между температурой воды на входе и выходе из правой/левой кессонированной стенки ПВ; $q_{\text{пр}}$ и $q_{\text{л}}$ – расходы воды на правую и левую стороны печи.

Основной переменной, отвечающей за создание благоприятных условий для формирования кондиционного штейна (содержание меди 55–60 %) и шлака (содержание меди менее 1 %), является температура расплава u , которая изменяется вследствие влияния неконтролируемых возмущений F : давления воздуха, природного газа и кислорода, химико-минералогического и гранулометрического состава сырья (рис. 2). Предлагаемая структура модели объекта включает передаточную матрицу $W(s)$ по каналу возмущения, инерционное звено с постоянной времени T , коэффициенты усиления k_1 – k_4 по различным каналам управления u_1 – u_4 , а также звеньев запаздывания τ_1 – τ_4 и сумматоры. Усилительное звено с коэффициентом k количественно характеризует связь температуры расплава u с температурой охлаждающей воды θ . Управляющие воздействия по различным каналам формируются управляющими устройствами (регуляторами) УУ₁–УУ₄.

В настоящее время управление подсистемами возможно только вручную. Актуальны исследования и разработки по автоматизации процессов управления, что требует построения математических моделей объекта. Трудность моделирования связана с отсутствием аналитических, табличных

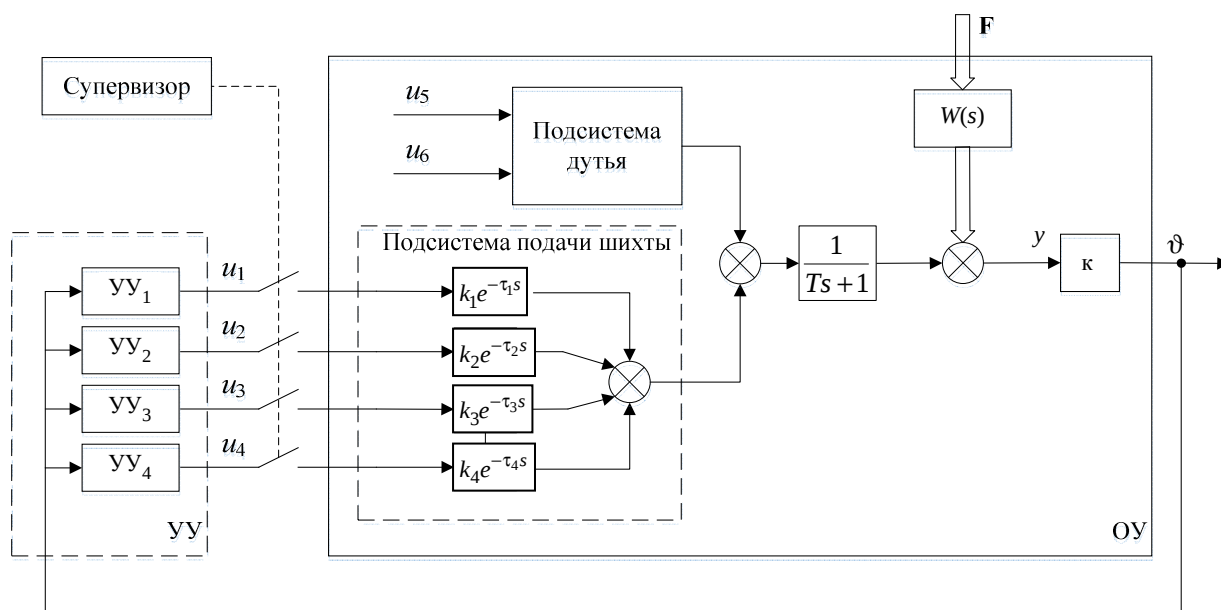


Рис. 2

или иных форм описания объекта из-за сложной природы физико-химических взаимодействий разнородных веществ в шахте ПВ. Возможные решения вытекают из опыта ведения процесса Ванюкова для конкретных печей [4], [5].

Целью статьи является моделирование динамики ПВ как объекта стабилизации температуры расплава.

Априорная информация об объекте управления. Успешное управление ПВ зависит от выбора управляющих воздействий: u_1 – u_4 – расходы компонентов шихты (металлосодержащих продуктов, бедных оборотов, дробленого песчаника, угля); объемные расходы технологического кислорода u_5 и природного газа u_6 . При значительных колебаниях состава шихты в ПВ подается природный газ, что позволяет стабилизировать процесс в тепловом отношении и компенсировать недостаток тепла, выделяемого при экзотермических реакциях диссоциации и окисления высших сульфидов в составе загружаемых компонентов [2], [3], [6], [7].

Исходной информацией для построения математической модели ПВ могут служить специализированная литература, данные оперативного контроля и ретроспективные данные, технологическая документация предприятия. Исследования характера и степени влияния воздействий на режимные параметры приведены в [4], где связи между управляющими воздействиями и температурой расплава выражены в виде коэффициента усиления $K_T = \Delta\theta/\Delta x$, где $\Delta\theta$ – отклонение температуры от базового значения 1290 °C; Δx – изменение управляющего воздействия. Анализ результатов экспериментов на опытно-промышленной печи выявил высокую степень влияния расхода воздуха и расхода кислорода на температуру ($K_{T,B} = 62$ °C/(нм³ · ч) и $K_{T,K} = 120$ °C/(нм³ · ч) соответственно). Показано, что согласованное изменение загрузки медного концентрата и объемного расхода кислорода не влияет на температурный режим ($K_{T,3} = 2$ °C · м³/т). Там же отмечена возможность управления только загрузкой концентрата ($K_{T,M} = 10$ °C · ч/т) при постоянном дутьевом режиме.

Аналогичные данные для реальных промышленных печей отсутствуют. Опрос операторов ПВ показывает, что эффективно управлять температурой расплава на конкретном режиме можно, только изменяя расход компонентов шихты, которые регулируются скоростью ленточных питателей. Соотношение расходов кислорода и газа должно быть неизменным и поддерживаться примерно равным $u_5/u_6 \approx 6...7$.

Доступную информацию от операторов ПВ можно свести к следующим положениям.

1. Кратковременное (5...10 мин) изменение расхода кислорода на низком режиме с 10 000 до 11 000 нм³/ч вызывает повышение температуры расплава примерно на 50 °C за 60 мин с последующим снижением до прежнего значения. Увеличение расхода кислорода на среднем режиме с 20 000 до 22 000 нм³/ч вызывает повышение температуры расплава примерно на 50 °C в течение 20 мин с последующим снижением до прежнего значения. Сказанное позволяет выдвинуть гипотезу об устойчивости этих режимов.

2. По мнению операторов, кратковременное увеличение расхода кислорода на высоких режимах может вызвать неустойчивый характер процессов. Работа ПВ на высоком (автогенном) режиме с подачей чистого технологического кислорода приводит к быстрому износу футеровки печи и возможно при отсутствии тугоплавких компонентов в составе шихты.

3. Изменение расхода газа с 2000 до 2200 нм³/ч (расход газа на одну горелку 100...150 нм³/ч) приводит к росту температуры на 50 °C за 30 мин. При значительном изменении состава сырья (плохом качестве загружаемого материала) необходимо существенно увеличить расход газа, путем вскрытия дополнительных фурм ПВ.

4. Увеличение расхода медного концентрата на среднем дутьевом режиме (15 000...20 000 нм³/ч) снижает температуру расплава в течение 20 мин.

5. Небольшое увеличение подачи флюса (песчаника) вызывает рост температуры расплава, что объясняется особенностями химических реакций процесса.

6. Увеличение подачи угля вызывает почти моментальное повышение температуры, расплав становится более жидкотекучим.

7. Химический состав штейна и шлака определяет лаборатория с интервалом в 2 и 4 ч соответственно, что затрудняет получение достоверной информации.

8. Основное возмущение для подсистемы дутья – давления кислорода и газа.

9. Влажность поступающих материалов (до 7 %) оценивается органолептически.

10. На средних режимах плавка длится примерно 4 ч. Чем выше режим, тем меньше длительность плавки.

11. В нормальном режиме функционирования ПВ расход кислорода, давления кислородно-воздушной смеси и природного газа регулируются

автоматически. Ручной режим используется только при запуске или остановке печи.

Варианты управления температурой расплава ПВ:

- изменение соотношения объемный расход кислорода/массовый расход шихты. Данный способ позволяет эффективно стабилизировать температуру расплава ПВ и уменьшить отклонения процентного содержания цветных металлов в составе штейна;

- изменение соотношения расход шихты/расход природного газа;

- изменение процентного соотношения кислорода в дутье;

- изменение расхода угля при постоянном дутьевом режиме. В этом случае температура изменяется незначительно, а состав штейна – существенно. Это связано с тем, что горение угля в ванне в тепловом отношении лишь немногим более эффективно, чем окисление шихты;

- изменение соотношения расход угля/расход воздуха;

- изменение массового расхода медного концентрата.

Последний способ управления наиболее предпочтителен, так как не требует периодической подстройки дутьевого режима.

Выбор технологического режима. Режим ПВ устанавливается диспетчером завода в зависимости от остатков медного концентрата, поступающего из обогатительных фабрик, флюса (песчаник, уголь) в приемных бункерах и наличия тяги в газоходном тракте системы.

В работе ПВ можно условно выделить три основных режима (табл. 1), определяемых расходом технологического кислорода: низкий (14 000...16 000 $\text{нм}^3/\text{ч}$), средний (18 000...20 000 $\text{нм}^3/\text{ч}$), высокий (25 000...30 000 $\text{нм}^3/\text{ч}$) дутьевые режимы.

Низкий режим соответствует периоду запуска (разогрева) печи. При работе плавильного агрегата на максимальное извлечение серы из отходящих газов ПВ переводят на высокий режим с подачей в реакционную зону чистого технологического кислорода. Данный режим позволяет вести процесс с высокой удельной производительностью по штейну, но служит причиной существенных потерь меди. На высоком режиме часто формируется большой объем шлака с высоким содержанием цветных металлов, что требует существенных затрат на его повторную переработку.

Анализ работы ПВ показывает большую частоту изменений режимов по кислороду (до двух переключений в смену). На рис. 3 приведена гистограмма частот по расходу технологического кислорода за два месяца. Чаще всего диспетчер устанавливает режим ПВ, соответствующий 18 000 $\text{нм}^3/\text{ч}$ (средний режим). Установлено, что с точки зрения технико-экономических показателей средний режим приводит к меньшим износу футеровки печи, внеплановым остановкам и расходу энергоносителей.

Задача управления – поддержание заданной температуры расплава при малом изменении массового расхода металлосодержащих компонентов шихты. Измерить температуру расплава непо-

Таблица 1

Режим	Расход кислорода, $\text{нм}^3/\text{ч}$	Давление кислорода, кПа	Давление воздуха, кПа	Расход воздуха, $\text{нм}^3/\text{ч}$	Расход КВС, $\text{нм}^3/\text{ч}$	Давление КВС, кПа	Содержание кислорода в КВС, %	Расход газа, $\text{нм}^3/\text{ч}$
Низкий	16 000	160	155	7000	23 000	95	63	3300
Средний	18 000	160	143	8000	25 000	95	75	3500
Высокий	27 000	160	150	9000	30 000	96	80	3500

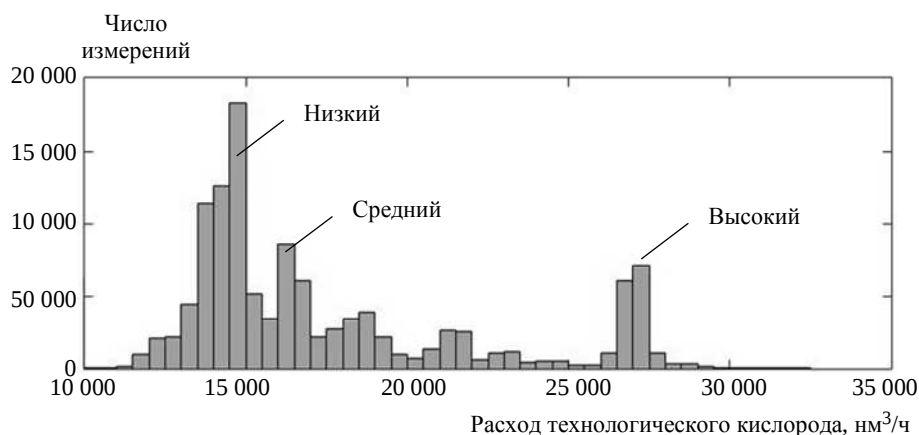


Рис. 3

средственно не удастся из-за высокой агрессивности среды. Как показывает опыт ведения процесса, разница температур шлака и штейна незначительна (не более 50 °С). Это позволяет реализовать управление, ориентируясь на температуру шлака, которую можно косвенно оценивать по температуре охлаждающей воды на сливе с третьего кессонированного пояса горна печи.

Дальнейшей задачей становится построение линейной стационарной модели для малых отклонений температуры от среднего режима.

Выбор структуры и параметров модели.

Анализ априорных данных о влиянии управляющих воздействий на температуру расплава в среднем режиме дает основание для принятия гипотезы о структуре модели, приведенной на рис. 2. Дальнейшее раскрытие неопределенности модели достигается при конкретизации параметров [8], [9].

Постоянная времени печи T по мнению операторов составляет 1200...1800 с и может быть также оценена по объему и теплоемкости расплава. Коэффициенты усиления по различным кана-

лам определяются теплотворной способностью компонентов шихты. Запаздывания определяются скоростями химических реакций высших сульфидов в барботажной зоне ПВ и особенностями транспортировки материалов (время перемещения компонентов шихты по сборочным конвейерам ≈ 40 с). Их примерные численные значения приведены в табл. 2. Коэффициенты усиления линеаризованной модели процесса плавления приведены в относительных единицах.

Кривая 0 на рис. 4 показывает недопустимые изменения температуры расплава, вызванные тестовым возмущением в виде прямоугольного импульса амплитудой 0.1 и длительностью 1000 с, который начинает действовать на 1000-й с. Для ослабления влияния неконтролируемых возмущений необходимо разработать систему стабилизации – выбрать закон регулирования и оптимизировать его настройки.

Компьютерная модель системы автоматической стабилизации температуры. На рис. 5 приведена компьютерная модель системы автома-

Таблица 2

Номер канала	Вход объекта	Выход объекта	k_i	T, c	τ_i, c
1	Расход металлосодержащих компонентов	Температура шлака	0.3...0.8	1200...1800	500...600
2	Расход оборотов		0.2...0.5		100...300
3	Расход песчанника		0.2...0.5		500...600
4	Расход угля		0.01...0.06		100...300

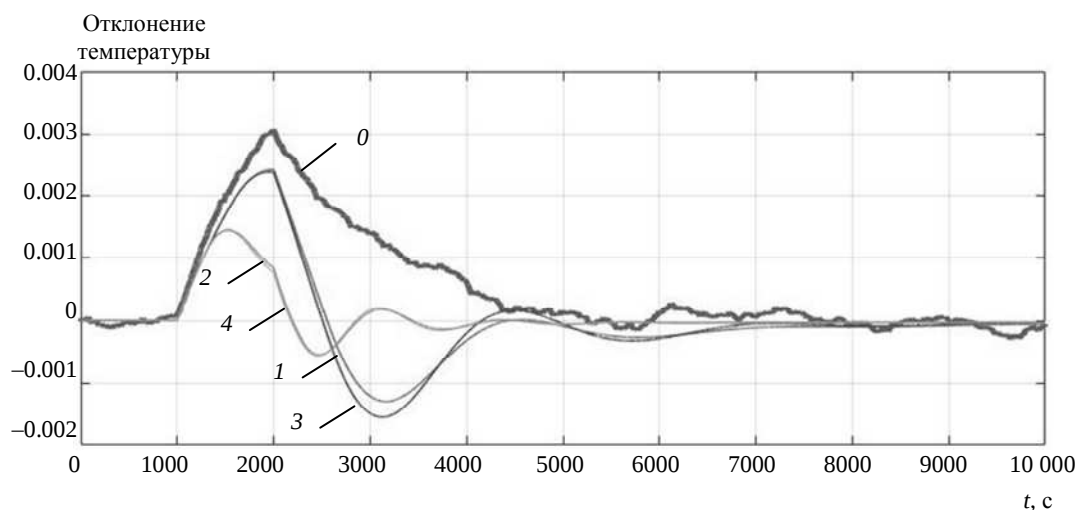


Рис. 4

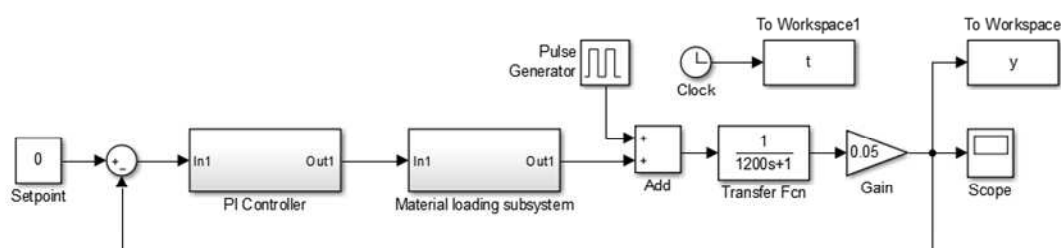


Рис. 5

тической стабилизации температуры расплава ПВ. Параметры модели объекта выбраны в соответствии с табл. 2.

Из-за больших различий характеристик объекта рассчитываются системы регулирования для разных каналов управления. На каждом канале используется ПИ-регулятор с параметрами, приведенными в табл. 3. За векторный критерий оптимизации принят минимум максимального отклонения и времени процесса.

Таблица 3

Номер канала	Параметры ПИ-регуляторов	
	K_P	K_I
1	68.52	0.025
2	280.01	0.017
3	107.97	0.046
4	2681.39	0.152

Имитация работы системы проводится последовательным включением одного из регуляторов выбранного канала. На рис. 4 представлены реакции системы автоматической стабилизации при управляющем воздействии на объект по различным каналам (кривые 1–4).

Сравнительный анализ результатов компьютерной имитации и поведения реального объекта показывает значительные расхождения динамических характеристик объекта и модели. Предложенная математическая модель объекта недостаточно адекватна и не может использоваться для расчета систем управления.

Необходимы экспериментальные исследования и обработка данных с целью уточнения структуры и параметров модели объекта.

Схема идентификации ПВ как объекта стабилизации температуры расплава. Активные эксперименты с ПВ необходимо проводить на конкретном среднем режиме работы.

Они могут проводиться под руководством опытного оператора при соблюдении необходимых предосторожностей, исключающих возникновение аварийных ситуаций (появление метана в рабочей зоне цеха, выплеск расплава из печи, остановка выпуска расплава из боковых сифонов, зарастание устьев фурм магнетитом, забивание загрузочных точек в своде ПВ, течь воды по телу кессона).

В качестве тестовых сигналов по различным каналам управления предлагается использовать импульсные воздействия небольшой амплитуды (10 % от номинальных значений), что позволит избежать проявления нелинейных эффектов. Импульсные воздействия допустимой длительности, определяемой ограниченным временем эксперимента и инерционности процесса, должны позволить получить заметные на фоне помех отклики объекта управления. Выходной параметр печи – температура расплава в процессе эксперимента определяется по температурным датчикам в кессонах печи и вручную с помощью пирометра излучения через смотровое окно.

К основным этапам параметрической идентификации относятся:

- выбор режима работы ПВ;
- формирование длительности импульсного воздействия по выбранному каналу управления исходя из предполагаемой инерционности объекта. В случае отсутствия отклика повторить эксперимент с импульсами большей длительности;
- регистрация изменений температуры расплава на импульсные воздействия;
- обработка экспериментальных данных.

Примерное число экспериментов по одному каналу управления можно выразить как $N = t/(Ti)$, где t – время, отведенное на идентификацию; T – предполагаемая инерционность объекта управления; i – количество каналов управления. При проведении идентификации печи в течение одной рабочей смены по одному каналу управления можно подать не более двух тестовых сигналов. Ограничение числа экспериментов подтверждает требование к наличию исходной информации о процессе.

На основе априорной информации о процессе плавления медно-никелевых сульфидных руд в печи Ванюкова построена математическая модель объекта, пригодная для синтеза регуляторов температуры расплава. Компьютерная имитация системы с избыточным вектором управления показывает, что информации о динамических характеристиках печи, полученной от литературных источников, технологов и операторов, недостаточно для разработки модели, адекватно описывающей объект на среднем режиме работы. Предложена схема проведения активной идентификации объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алсуфьев Е. А. Исследование возможности контроля температуры кессонированного пояса печи Ванюкова // Зап. Горного ин-та. 2003. Т. 155. С. 160–161.

2. Галкин С. А., Шариков Ю. В. Математическое моделирование процесса плавки в жидкой ванне и создание модели системы регулирования // Зап. Горного ин-та. 2008. Т. 177. С. 144–147.

3. Ванюков А. В., Быстров В. П., Васкевич А. Д. Плавка в жидкой ванне. М.: Metallurgy, 1988. 208 с.

4. Ванюков А. В., Уткин Н. И. Комплексная переработка медного и никелевого сырья. Челябинск: Metallurgy, 1988. 432 с.

5. Спесивцев А. В. Metallurgical process as an object of study: new concepts, systematization, practice. СПб.: Изд-во Политехн. ин-та, 2004. 307 с.

6. Суляев И. И. Нейромодель технологического процесса подготовки кислородно-воздушной смеси

как объекта управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 6. С. 20–25.

7. Суляев И. И., Имаев Д. Х. Концептуальная модель иерархической системы управления процессом плавки медно-никелевого сырья // Сб. докл. конф. «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2014). СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», 2014. С. 211–220.

8. Вавилов А. А., Имаев Д. Х. Эволюционный синтез систем управления / ЛЭТИ. Л., 1983. 80 с.

9. Теория автоматического управления / С. Е. Душин, Н. С. Зотов, Д. Х. Имаев и др. М.: Высш. шк., 2005. 567 с.

I. I. Sulyaev, D. H. Imaev

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

MODELING OF COPPER SMELTING FURNACE AS THE OBJECT OF MOLTEN MASS TEMPERATURE OPERATION

Deals with the task of mathematical model development of copper-nickel raw materials melting process in the Vanyukov furnace as the object of molten mass temperature operation. There was carried out systematic analyses of the object as well as there was built conceptual model with the principle of revelation consistency according to vagueness. Method of metallurgical furnace active identification realization is submitted.

Vanyukov furnace, melt temperature, control, decomposition, mode, dynamic model
