

УДК 669.162.21-52:007:159.955

*Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Белькова А.И., Белошاپка Е.А.*

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, г. Днепр

Представлены функциональные и алгоритмические особенности разработанной в Институте черной металлургии интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой. Идеология построения интеллектуальной системы основана на диагностике и принятии решений по управлению процессом плавки на основе расчета комплексных критериев оценки процессов, что отличает ее от известных модельных систем. В комплексных критериях объединены технологические параметры и выходные данные систем автоматизированного контроля процессов. Предложены и реализованы в системе два методических подхода к созданию комплексных показателей, на основе которых разработаны критерии оценки: теплового состояния доменной плавки, газодинамического режима, формы и положения пластичной зоны, эффективности осевой коксовой отдушины, воздействия расплавов на футеровку металлоприемника и интегрального показателя доменной шихты. Показано, что основными структурными комплексами системы являются: контрольно-измерительный (база данных); база знаний; расчетный; модельный; диагностический, формирования рекомендаций по управлению доменной плавкой. Выполнена адаптация разработанной интеллектуальной системы к технологическим условиям работы ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Обоснован выбор базовых режимов работы печи и опытных периодов для апробации системы. Рассчитаны значения критериев оценки процессов плавки и определены оптимальные диапазоны изменения. Выполнена диагностика хода печи в исследуемых периодах ее работы и разработаны рекомендации по управлению процессом плавки.

**Ключевые слова:** доменная плавка, критерии оценки процессов, функционально-алгоритмическая структура интеллектуальной системы.

### *Постановка проблемы*

Доменная плавка, представляющая собой совокупность физико-химических превращений и механических процессов, происходящих в доменной печи, является сложным с точки зрения управления объектом. Эффективность управляющих воздействий на ход процессов в печи определяется квалификационным уровнем операторов, для поддержки принятия которыми конкретных решений по управлению ходом печи в последние годы разработаны и реализованы информационно-моделирующие системы (экспертные системы).

### *Формулирование цели исследования*

Целью выполненных исследований являлась разработка первой отечественной интеллек-

туальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой.

### *Анализ последних исследований и публикаций*

Применяемые в настоящее время экспертные системы отличаются набором выполняемых функций, уровнем технического, математического и информационного обеспечения, а также иерархической структурой [1–2]. Наибольших успехов в разработке и реализации экспертных систем добились за рубежом. В частности, к наиболее известным можно отнести экспертные системы, разработанные фирмами Siemens VAI (Германия, Австрия) и Sollac (Франция). Как показал опыт использования таких систем, они плохо адаптируются к условиям украинских предприятий. Кроме того, эти системы являют-

ся модельными и используют информацию автоматизированных систем для настройки и адаптации математических моделей, на основе которых функционируют экспертные системы.

#### *Изложение основного материала исследования*

Основой для создания в Институте черной металлургии НАН Украины первой отечественной экспертной системы по управлению процессом плавки явились разработанные в течение последних двух десятилетий современные системы автоматизированного контроля процессов плавки, которые в наиболее полном объеме установлены на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» [3].

Идеология построения интеллектуальной системы основана на диагностике и принятии решений по управлению процессом плавки на основе расчета комплексных критериев оценки процессов, что отличает ее от известных модельных систем. В комплексных критериях объединены технологические параметры и выходные данные систем автоматизированного контроля процессов, что в значительной степени облегчит принятие операторами решений по управлению доменной плавкой. Создание таких комплексных критериев особо актуально в современных условиях ведения доменной плавки, характеризующихся ухудшением свойств шихтовых материалов и непостоянством их состава, использованием значительного количества вторичных ресурсов и отсеваемых фракций, а также различных углеродсодержащих добавок, в том числе, пылеугольного топлива.

Предложены и реализованы в системе два методических подхода к созданию комплексных критериев. Согласно первому подходу процесс разработки критерия представлен двумя этапами – разработка показателя оценки процесса и преобразование показателя в критерий. Выбор параметров, которые могут быть использованы в качестве аргументов показателя процесса плавки, осуществлялся на основе анализа их корреляционных зависимостей от технологических параметров, принятых в качестве критериев оценки процессов. Для равнозначного влияния каждого из выделенных параметров на показатель принимается мультипликативная форма его представления (в виде произведения параметров). Каждый из входящих в показатель параметров принимается в качестве аргумента критерия. На первом этапе построения критерия выполняется процедура нормирования аргументов с учетом их нормального закона распре-

ления.

Следующим этапом предусматривается выполнение логит-преобразования каждого аргумента разрабатываемого критерия, в результате которого выходная величина приводится к диапазону 0...1.

В логит-регрессионной модели предсказанные значения зависимой переменной или переменной отклика не могут быть меньше (или равными) нулю, или больше (или равными) единице, не зависимо от значений независимых переменных. Поэтому, эта модель часто используется для анализа бинарных зависимых переменных или переменных отклика. Термин «логит» был впервые использован Джозефом Берксоном в 1944 г. [4]. Для выполнения логит-преобразования используется уравнение:

$$F(X_i) = \frac{1}{1 + e^{-X_i}}.$$

В результате преобразований критерий определяется как среднее геометрическое логит-преобразованных нормированных аргументов.

Второй подход к созданию критерия заключается в использовании обобщенной функции желательности Харрингтона, позволяющей разноразмерные показатели преобразовать в безразмерную шкалу желательности и «свернуть» их в единый обобщенный показатель, что дает возможность выполнить всестороннюю оценку объекта и повысить информационную мощьность критерия оптимизации.

Первый подход применен для разработки критериев оценки: теплового состояния доменной плавки, газодинамического режима, эффективности осевой отдушины, воздействия расплава на футеровку металлоприемника, а также оценки формы и положения пластичной зоны в доменной печи. Второй подход положен в основу создания интегрального показателя доменной шихты.

Представленная на рис. 1 функционально-алгоритмическая структура интеллектуальной системы позволяет проанализировать взаимодействие составных комплексов системы.

Система подразделена на структурные комплексы (подсистемы), которые в свою очередь состоят из отдельных блоков. Основными структурными комплексами являются: контрольно-измерительный (база данных); база знаний; расчетный; модельный; диагностический, формирования рекомендаций по управлению доменной плавкой. Контрольно-измерительный ком-

плекс – «База данных» (БД) является информационной моделью и отображает состояние процесса. Отличительной особенностью организации данных в БД является их интегрирование и обеспечение многопользовательского режима. Важной особенностью формирования баз данных разрабатываемой для условий ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» интеллектуальной системы поддержки принятия решений является объединение в единый комплекс традиционно контролируемых технологических параметров и расчетных показателей плавки, а также информации, поступающей от автоматизированных систем контроля доменной плавки: разгара футеровки горна и лещади («Разгар»), распределения дутья по фурмам («Фурма»), контроля и прогноза шлакового режима («Шлак»), информационной системы отображения информации радиолокационного профилемера [3].

**База знаний.** База знаний интеллектуальной системы содержит технологические признаки, на основе которых диагностируется ход печи, а также рекомендации, регламентированные Технологической инструкцией по ведению доменной плавки на конкретной доменной печи, и представленные последовательностью рекомендуемых действий. На основе этой информации, записанной в базе знаний, экспертная система в соответствии с конкретной обстановкой, диагностирует ход печи и генерирует решение о порядке выполнения операций (дей-

ствий) по его нормализации. Расчетная подсистема интегрирует в своем составе два блока:

1. Блок расчета критериев оценки процессов плавки, предназначенных для оценки: теплового состояния доменной плавки ( $K_t$ ), газодинамического режима ( $K_{gd}$ ), формы и положения пластичной зоны ( $K_{cz}$ ), эффективности осевой коксовой отдушины ( $K_o$ ), воздействия расплава на футеровку металлоприемника ( $K_{sf}$ ) и интегрального показателя доменной шихты ( $K_{ш}$ ).

2. Блок расчета положения, конфигурации и толщины пластичной зоны. Расчет базируется на методе определения формы и положения пластичной зоны на основе показаний профилемера, в дополнение к которому, в случае отсутствия возможности получения исходной информации, может привлекаться математическая модель определения положения линии плавления и эффективной площади плавления. Определение с помощью математических моделей выгрузки шихтовых материалов из бункера БЗУ и радиального распределения шихты на колошнике компонентного состава материалов в зонах сечения колошника позволяет определить толщину пластичной зоны. Системная реализация этих подходов позволяет рассчитать критерий оценки пластичной зоны, а также определить ее форму, толщину и положение, т.е. ее основные параметры, в значительной степени определяющие изменения программ загрузки шихтовых материалов.

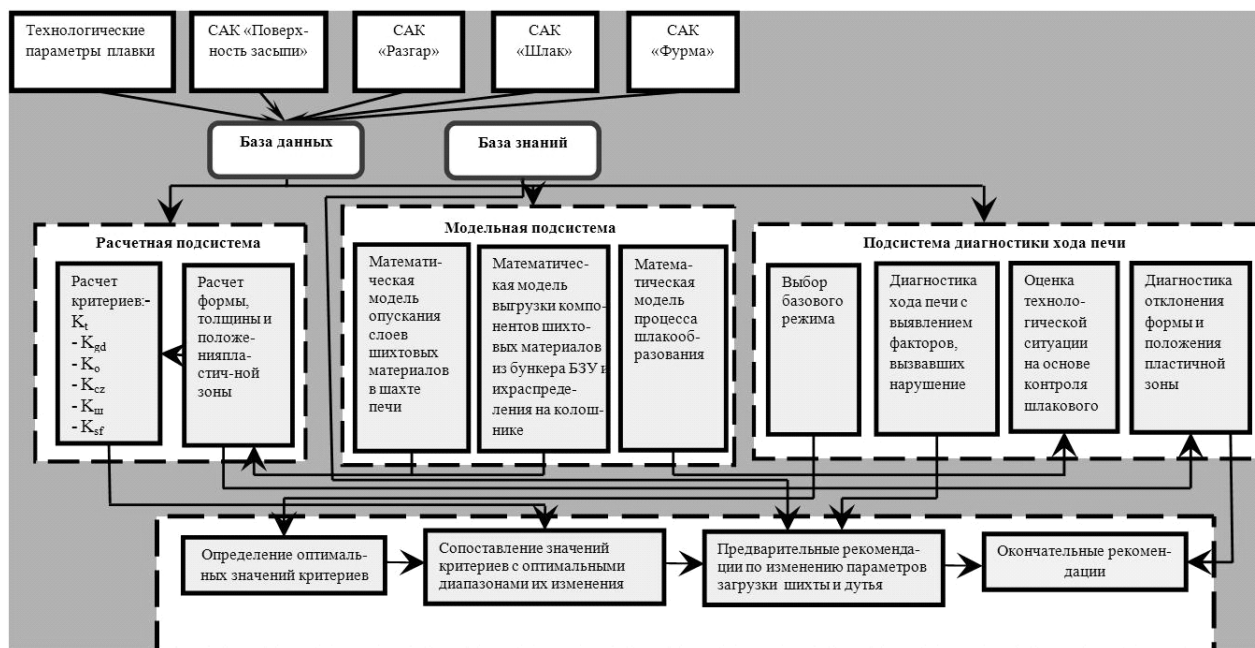


Рис. 1. Функционально-алгоритмическая структура интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой

Модельная подсистема состоит из трех блоков, каждый из которых представляет определенную функциональную математическую модель:

1. Математическая модель опускания слюев шихты, сформированных на колошнике, в шахте доменной печи. Результаты моделирования позволяют сформировать структуру пластичной зоны.

2. Модель, синтезированная на основе объединения двух моделей – выгрузки шихтовых материалов из бункера БЗУ и распределения материалов на колошнике, позволяющая определить распределение компонентов шихтовых материалов в зонах сечения колошника.

3. Математическая модель процесса шлакообразования.

Подсистема диагностики хода доменной печи. Функционирование подсистемы обеспечивается анализом поступающей из структурных комплексов информации. Подсистема представляет собой программный модуль, предназначенный для раннего обнаружения намечающихся расстройств доменной печи. Ход печи диагностируется, с одной стороны, на основе сопоставления значений рассчитанных критериев оценки процессов плавки с оптимальными диапазонами их изменения, с другой – на основе анализа когнитивных знаний, находящихся в Базе знаний системы. Для установления допустимого диапазона изменения критерия, обеспечивающего целевую функцию управления процессом плавки – минимизацию расхода кокса и требуемый уровень производства кондиционного чугуна, применен разработанный в ИЧМ метод многокритериальной оптимизации [5], основные аспекты которого сводятся к следующему. По накопленным эксплуатационным данным готовится исходная выборка в пространстве параметров в виде матрицы  $\{A_{ij}\}$ , прошедшей специальную экспертизу на корректность в подсистеме «Операции с данными» пакета прикладной статистики. Каждый из критериев рассматривается как поверхность – отклик в гиперпространстве параметров оптимизации. Суперпозиция таких поверхностей в выбранных координатных сечениях дает возможность сопоставить локальные оптимумы всех поверхностей одновременно и рационально выбрать параметры, удовлетворяющие указанным требованиям. Задача оптимизации сводится, таким образом, к построению необходимых математических моделей для точечных экспериментальных функций – откликов с последующей геометрической

интерпретацией в виде трехмерных картограмм.

В качестве примера, иллюстрирующего использование метода многокритериальной оптимизации для определения оптимального диапазона изменения одного из функционирующих в составе системы критериев, на рис. 2 приведена картограмма, полученная в результате совместного рассмотрения картограмм, отражающих, в частности, связь критерия теплового состояния плавки, содержания кремния, суммарного расхода топлива и производства чугуна.

На основе рассмотрения картограммы определяется оптимальный диапазон изменения критерия (на рисунке оптимальная область обозначена черным цветом).

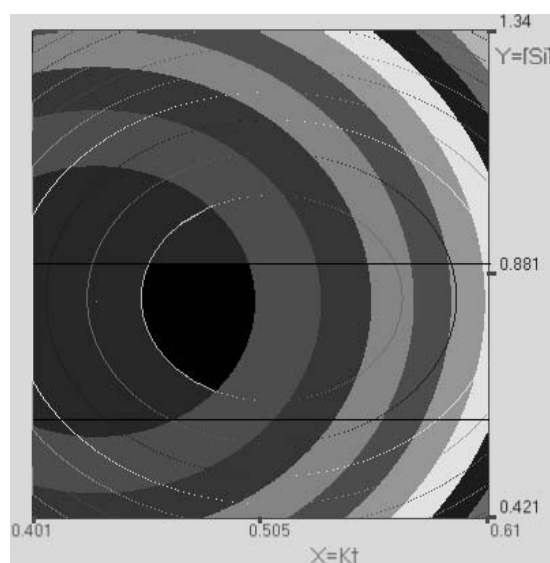


Рис. 2. Трехмерная диаграмма для определения оптимальных значений критерия оценки теплового состояния, соответствующих максимальной производительности печи и минимальному расходу суммарного топлива

Одним из блоков, входящих в состав подсистемы диагностики, является блок диагностики отклонения положения и формы пластичной зоны в доменной печи от их рациональных значений. Блок функционирует на основе данных о форме и положении пластичной зоны, поступающих от расчетной подсистемы.

Для оценки хода печи с помощью соответствующих критериев подсистема содержит блок выбора базового режима плавки.

Подсистема формирования рекомендаций по управлению доменной плавкой. Подсистема

объединяет два блока — генерации предварительных рекомендаций и формирования окончательных рекомендаций по управлению доменной плавкой. Формирование предварительных рекомендаций осуществляется по результатам диагностики хода печи на основе сопоставления значений рассчитанных критериев оценки процессов плавки с оптимальными диапазонами их изменения, а также рекомендаций, содержащихся в Базе знаний системы и применимых в зависимости от отклонений хода печи от нормального. Окончательные рекомендации являются результатом совместного анализа предварительных рекомендаций и выходных параметров блока диагностики отклонения формы и положения пластичной зоны от их рациональных значений.

Представление технологическому персоналу необходимой информации о ходе доменной плавки осуществляется с помощью подсистемы отображения информации. При этом поддерживаются два режима:

- автоматический (постоянный вывод информации на монитор компьютера);
- диалоговый (по запросу пользователя).

Подсистема также обеспечивает визуализацию промежуточных и конечных результатов функционирования структурных комплексов интеллектуальной системы, в том числе, предварительных и окончательно сформированных рекомендаций по изменению параметров загрузки шихтовых материалов либо параметров дутьевого режима плавки.

Целевыми функциями интеллектуальной системы являются минимизация расхода кокса, обеспечение требуемой производительности печи, выплавка кондиционного чугуна, температура жидких продуктов плавки в соответствии с требованиями последующего сталеплавления передела. При этом должны быть выполнены соответствующие ограничения технологии доменной плавки, обеспечивающие минимальную вероятность попадания технологического состояния печи в так называемые «критические» области (критические, аварийные режимы работы).

Выполнена адаптация разработанной интеллектуальной системы к технологическим условиям работы ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Обоснован выбор базовых режимов работы печи и опытных периодов для апробации системы. Рассчитаны значения критериев оценки процессов плавки и определены оптимальные диапазоны изменения. Выполнена диагностика хода печи в исследуемых периодах

ее работы и разработаны рекомендации по управлению процессом плавки.

### **Выводы**

Опыт использования зарубежных экспертных систем свидетельствует о неудовлетворительной их адаптации к условиям металлургических предприятий Украины. Основываясь на предложенной в Институте черной металлургии НАН Украины идеологии, разработана интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой. Представлена функционально-алгоритмическая структура интеллектуальной системы и особенности взаимодействия ее подсистем.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Информационные системы в металлургии* / Спирин Н.А., Ипатов Ю.В., Лобанов В.И. и др. — Екатеринбург: Уральский государственный технический университет, 2001. — 617 с.
2. *Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки* / Спирин Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю. и др. — Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2011. — 462 с.
3. *Доменное производство «Криворожстали»*. Монография под ред. чл.-корр. НАНУ В.И. Большакова / Большаков В.И., Бородулин А.В., Гладков Н.А. и др. — ИЧМ НАНУ, «Криворожсталь». Днепропетровск, Кривой Рог, 2004. — 378 с.
4. *Berkson J. Application of the logistic function to bio-assay* // *Journal of the American Statistical Association*. — Vol.39. — No. 227.
5. *Тогобицкая Д.Н.* Система анализа и выбора рациональных режимов работы металлургических агрегатов на ЭВМ // *Черная металлургия. Наука — технология — производство*. — М.: Металлургия, 1989. — С.384-390.

Поступила в редакцию 26.10.2016

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ  
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З УПРАВЛІННЯ ДОМЕННОЮ  
ПЛАВКОЮ**

*Муравйова І.Г., Тогобицька Д.Н., Семенов Ю.С.,  
Шумельчик Є.І., Бількова А.І., Білошанка О.А.*

*Представлені функціональні та алгоритмічні особливості розробленої в Інституті чорної металургії інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень з управління доменної плавкою. Ідеологія побудови інтелектуальної системи заснована на діагностиці та прийнятті рішень з управління процесом плавки на основі розрахунку комплексних критеріїв оцінки процесів, що відрізняє її від відомих модельних систем. У комплексних критеріях об'єднані технологічні параметри і вихідні дані систем автоматизованого контролю процесів. Запропоновано і реалізовано в системі два методичні підходи до створення комплексних показників, на основі яких розроблені критерії оцінки: теплового стану доменної плавки, газодинамічного режиму, форми і положення пластичної зони, ефективності осьової коксової віддушини, впливу розплавів на футерівку металоприймача та інтегральний показник доменної шихти. Показано, що основними структурними комплексами системи є: контроль-вимірний (база даних); база знань; розрахунковий; модельний; діагностичний, формування рекомендацій з управління доменною плавкою. Виконано адаптацію розробленої інтелектуальної системи до технологічних умов роботи ДП №9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Обґрунтовано вибір базових режимів роботи печі і випробувальних періодів для апробації системи. Розраховані значення критеріїв оцінки процесів плавки і визначені оптимальні діапазони їх зміни. Виконана діагностика ходу печі в досліджуваних періодах її роботи і розроблені рекомендації з управління процесом плавки.*

**Ключові слова:** доменна плавка, критерії оцінки процесів, функціонально-алгоритмічна структура інтелектуальної системи.

**INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM  
MANAGEMENT OF BLAST FURNACE SMELTING**

*Murav'eva I.G., Togobitskaya D.N., Semenov Iu.S.,  
Shumelchik E.I., Bel'kova A.I., Beloshapka E.A.*

*Annotation. In this paper are presented functional and algorithmic features of the intellectual system, which were developed in Z .I. Nekrasov Iron and Steel Institute for supporting in making decision on the management of blast furnace smelting. The ideology of building an intelligent system is based on the diagnostics and decision-making on the management of the melting process on the basis of the calculation of complex criteria for evaluating processes, which distinguishes it from known models systems. In complex criteria are combined technological parameters and output data of automated process control systems. In the system are proposed and implemented two methodological approaches for creation complex indicators, on the basis of which were developed evaluation criteria for: thermal state of blast furnace smelting, gas dynamic regime, shape and location of the plastic zone, efficiency of the axial coke vent, effects of melts on the lining of a metal receptacle and integral index of blast furnace charge. It is shown that the main structural complexes of the system are: control-measuring (database); knowledge base; Calculated; Model; Diagnostic and complex of recommendations formation for the management of blast-furnace smelting. Adaptation of the developed intellectual system was carried out in the technological conditions of the work of blast furnace No. 9 PJSC «ArcelorMittal Kryviy Rih». Also is justified the choice of the basic operating modes of the furnace and the experimental periods for approbation of the system. The values of the evaluation criteria for smelting processes were calculated and the optimum ranges of variation were determined. The diagnoses of furnace stroke were made in the periods of its operation and were developed recommendations for controlling the smelting process.*

**Keywords:** blast-furnace smelting, the criteria for assessing processes, functional and algorithmic structure of intelligent system.