

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 669.162.263

*В.Ю. Рыболовлев<sup>1</sup>, А.В. Краснобаев<sup>1</sup>, Н.А. Спирин<sup>2</sup>, В.В. Лавров<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

## ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩИХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛУРГИИ

В настоящее время на передовых металлургических предприятиях России функционируют мощные распределенные базы и банки данных. Это позволяет практически полностью решать проблемы хранения, контроля, защиты, ввода, редактирования и извлечения информации, а также формирования необходимых отчетных данных. В то же время отечественный и зарубежный опыт убедительно доказывает, что развитие предприятий металлургического комплекса, решение проблем энергосбережения, повышения качества и конкурентоспособности продукции на мировом рынке требуют усовершенствования систем оценки достоверности получаемой информации, систем использования информации, применяемых как для управления технологическими процессами, так и управления производством в целом. Информация сама по себе, как таковая, зачастую мало что дает для анализа и прогноза, для принятия решений и контроля за их исполнением. Необходимы надежные способы оценки ее достоверности и переработки информационного «сырья» в готовый продукт.

Конечная цель разработок систем управления технологическими процессами в металлургии – создание системы, обеспечивающей нормальную работу производства в целом при минимальной себестоимости продукции с учетом ограничений, обусловленных требованиями к ее качеству, технологии и возможностями оборудования. В области управления технологическими процессами в металлургии необходимо на основе разработки средств получения объективной информации о параметрах технологического процесса и имеющихся возможностей использования средств интеллектуального обеспечения максимально приблизить управление производством к автоматизированному. При анализе работы агрегата его следует рассматривать как управляемую технологическую систему. Для управления должны быть использованы подсистемы измерений, оценивания, хранения, обработки, представления информации, а также интеллектуальные системы управления, включая блок прогнозирования.

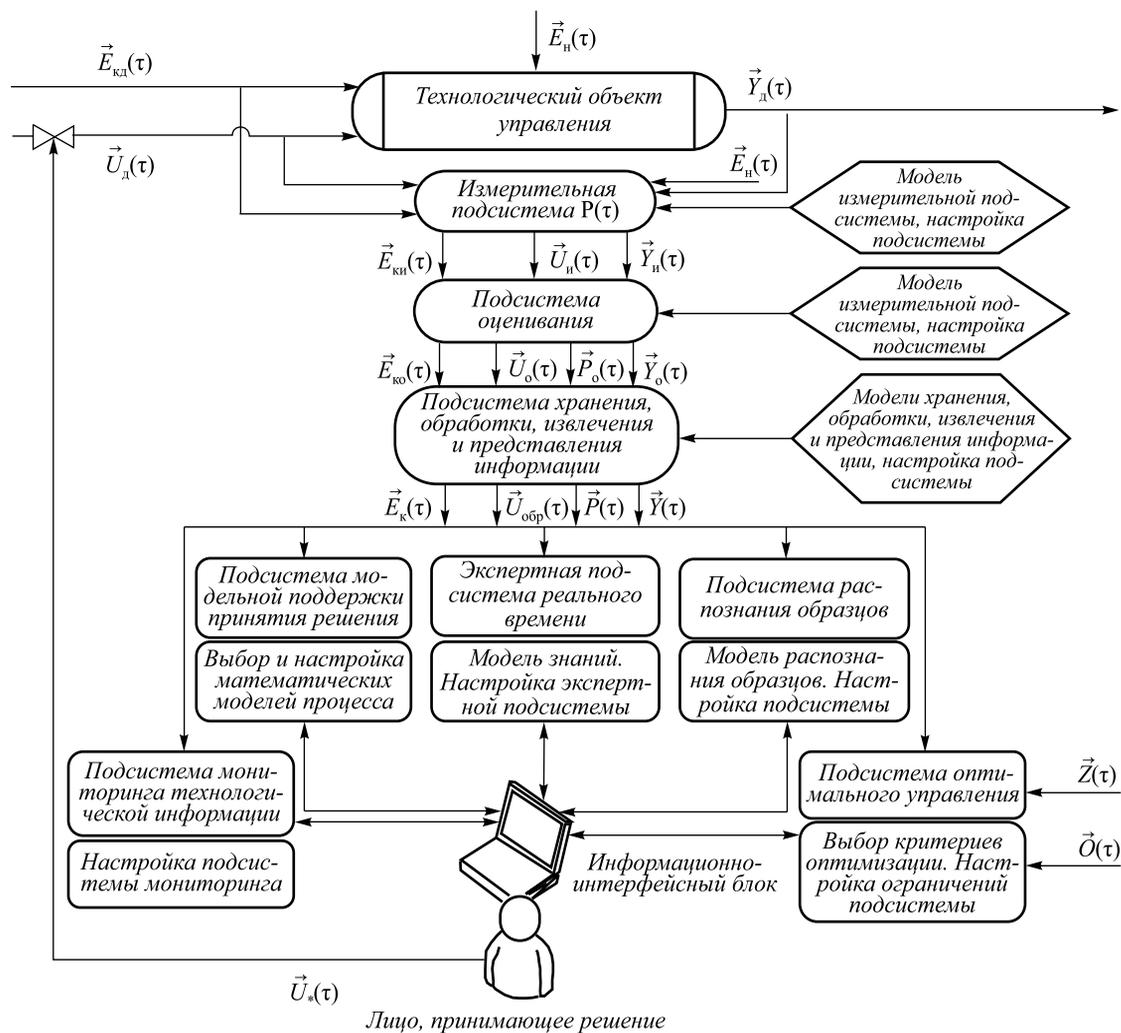
Автоматизированный технологический комплекс в металлургии как объект контроля и управления характеризуется следующими признаками [1 – 5]:

- большим объемом контролируемых переменных и расчетных признаков;
- низкой прозрачностью процесса из-за отсутствия возможности непосредственного контроля развития отдельных его стадий;
- существенным запаздыванием в получении информации о выходных показателях процесса, в связи с чем результаты непосредственного контроля часто не позволяют определять первопричину расстройств хода технологического процесса;
- глубокой взаимосвязью всех процессов плавки при ограниченности ресурсов на управление;
- наличием случайных измерительных помех различной природы и характера, что снижает качество информации.

Комплексный подход к учету всей совокупности перечисленных признаков диктует необходимость построения современных информационно-управляющих систем в металлургии [4 – 7].

На рисунке приведена обобщенная структура современной автоматизированной интеллектуальной системы управления сложного металлургического агрегата, характеризующая основные этапы обработки и использования информации. Заметим, что количество контролируемых входных параметров сложных металлургических агрегатов, например доменной печи, составляет более 300 (с учетом показателей химического состава и массы отдельных компонентов шихты); управляющих воздействий «сверху» и «снизу» около 10 (система загрузки, дутьевые параметры и т.д.); основных управляемых выходных показателей процесса более 10.

Показателями (целевой функцией, критериями) технологической эффективности работы печи, технологического персонала и информационной системы являются: удельный расход кокса, производительность печи, выход кондиционного чугуна по содержанию



Структура современной интеллектуальной системы управления технологическим процессом:

$\vec{Y}$  – выходные параметры;  $\vec{U}$  – управляющие воздействия;  $\vec{P}$  – параметры внутреннего состояния объекта;  $\vec{E}$  – помехи;  $\vec{Z}$  – цели управления;  $\vec{O}$  – ограничения системы; индексы характеризуют: «д» – действительное значение, «н» – неконтролируемые параметры, «и» – измеренные значения, «о» – оценку параметров, «\*» – оптимальные значения управляющих воздействий, «к» – контролируемые возмущения

в нем серы, температура жидких продуктов плавки в соответствии с требованиями последующего сталеплавильного производства. При этом должны быть выполнены ограничения на технологию доменной плавки, т.е. обеспечена минимальная вероятность попадания технологического состояния печи в так называемые критические области (критические, аварийные режимы работы).

Работа агрегатов комплекса находится под постоянным наблюдением сменных технологов, за которыми остается ведущая роль при решении многих задач управления. В связи с этим такой технологический комплекс следует относить к классу интерактивных человеко-машинных, автоматизированных информационно-управляющих систем. Архитектура современных АСУ ТП доменных печей характеризуется применением передовых системотехнических решений и строится на принципах стандартности, модульности, распределенности, открытости; обеспечения требуемых метрологических характеристиками измеритель-

ных каналов во всем диапазоне внешних воздействий окружающей среды; способности работать в широком диапазоне температур, вибраций, электромагнитных, электрических и сетевых помех; надежности с временем наработки на отказ более 50 000 ч; сопряженности измерительных средств с обширным парком датчиков и исполнительных механизмов.

Следует отметить особую роль математических моделей. Известный русский академик А.Н. Крылов в 1937 г. еще в период зарождения вычислительной техники и информатики предупреждал, «что если в вычислительное устройство загрузить информационный мусор, то на выходе вычислителя получим также мусор». Последующий опыт показывает, что только использование адекватных моделей разного класса (математических моделей технологических процессов, моделей знаний, моделей распознавания образов, моделей данных и т. п.) может обеспечить успешность и эффективность функционирования информационных систем. Интеллектуальным ядром такой переработки информа-

ции являются математические модели технологических процессов.

Заметим, что математическое содержание проблемы управления в трудах крупных математиков получило существенное развитие [8, 9]. В то же время академик РАН А.А. Красовский совершенно справедливо отмечал, что «... в развитии современной теории управления с точки зрения практики далеко не все обстоит благополучно. Классическую теорию автоматического управления в основном создавали инженеры для инженеров. Современную теорию управления создают в основном математики для инженеров и во все большей мере математики для математиков» [8]. Последнее с точки зрения практики вызывает определенное беспокойство. Главное негативное влияние на практическое внедрение методов современной теории управления оказывает масса оторванных от практических потребностей и возможностей работ интересных в математическом отношении, но пока бесплодных в отношении современных приложений. Нельзя отрицать право на существование математической современной теории управления как раздела математики, развивающегося по собственным законам и находящего применение по мере возникновения соответствующих потребностей. Однако такая математическая сторона современной теории управления должна быть достаточно четко выделена по отношению к прикладной ее стороне. Главная проблема заключается в принципиальном игнорировании многими математиками такого фундаментального понятия, как физическая сущность и индивидуальные особенности управляемого объекта [9]. Если на начальном этапе развития классической теории автоматического управления, а в последующем в математической теории оптимального управления, такое абстрагирование от физического содержания, несомненно, было полезным с точки зрения разработки основ теории, то на сегодняшний день развитие теории управления требует возврата и учета основополагающих свойств объекта управления, но уже на новом качественном уровне развития современной прикладной теории управления. В современной теории математическое содержание во многом подавляет физическое начало, формальный вычислительный подход не может быть перспективным направлением в развитии прикладной теории управления несмотря на мощь современной вычислительной техники [9, 10]. Следует особо подчеркнуть, что «компьютерная эйфория», сводящая сложную проблему математического моделирования технологических процессов и синтеза систем управления лишь к вычислительной мощности ЭВМ, полностью себя исчерпала.

Несмотря на информатизацию, развитие вычислительной математики и алгоритмов идентификации банки сертифицированных (верифицированных) математических моделей остаются слабо заполненными. Это связано с большими интеллектуальными и временными затратами на создание адекватных математических

моделей сложных процессов и систем. Для новых процессов и систем высокой сложности это создает большие трудности, так как эти процессы и системы, как правило, не могут функционировать без управления, а математическая модель часто не может быть идентифицирована и сертифицирована без реально функционирующей системы. Методологической основой создания моделей технологических процессов являются общая теория систем и системный анализ [10]. При использовании этой методологии модель технологических процессов состоит из математических моделей не только отдельных элементов, но и взаимодействия между элементами и внешней средой, описываемых оператором взаимодействия (взаимосвязи). Каждый элемент математической модели может иметь различную степень детализации математического описания. Важно лишь, чтобы входные и выходные параметры всех элементов модели находились во взаимном соответствии, что обеспечит получение замкнутой системы уравнений математической модели процесса в целом. В идеале математическое описание каждого элемента должно включать уравнения, параметрами которых являются только физико-химические свойства веществ. Однако получить такое фундаментальное описание свойств всех элементов, их взаимосвязей при существующем уровне знаний и исследований некоторых явлений металлургических процессов в настоящее время не всегда представляется возможным. Это связано еще и с тем чрезвычайным усложнением математического описания свойств элементов, что оно само по себе приводит к резкому усложнению математической модели процесса в целом и, кроме того, вызывает существенные вычислительные трудности при ее реализации. В связи с этим при практическом использовании описанного алгоритма на том или ином уровне детализации приходится применять и эмпирические соотношения.

Проиллюстрируем эти положения на примере доменного процесса. Современный уровень математического описания явлений в доменной печи не позволяет вскрыть все тонкости доменного процесса [1 – 3]. В настоящее время даже при самом строгом теоретическом учете всех особенностей процесса невозможно избавиться от массы коэффициентов, определяемых опытным путем. Из-за вынужденных упрощений (ограничения количества рассматриваемых зон, описания отдельных участков доменной печи, рассмотрения только стационарного состояния) эти модели носят конкретный характер, определяемый поставленными задачами. Составление и решение системы дифференциальных уравнений, описывающих закономерности тепло- и массообмена с учетом кинетики протекающих в объеме печи химических реакций, лежат в основе кинетических моделей доменного процесса [12 – 16]. Как показывает практика, кинетические модели позволяют решать определенный круг практических задач: получать температурные и концентрационные поля домен-

ной печи при плавке специальных чугунов, вдувании горячих восстановительных газов; оценивать влияние на показатели работы печи таких параметров плавки, как восстановимость, степень металлизации железорудных материалов, реакционная способность кокса; определять общие закономерности динамических характеристик печи по различным каналам. В ряде случаев кинетические модели обогащаются моделями газодинамики, что расширяет область их применимости [14, 15]. При условиях значительного расширения методов численного моделирования и дальнейшего исследования доменного процесса в перспективе появятся реальные предпосылки для использования полных аналитических кинетико-математических моделей доменного процесса с большими возможностями.

В то же время сегодня существуют серьезные проблемы при создании и использовании кинетических моделей этого класса [17], которые сводятся к следующим:

- отсутствие достаточных данных для достоверного описания процессов, протекающих в нижней части печи; так, нет надежных данных о зависимости скоростей восстановления железа и кремния от температуры, состава шлака и кокса, о коэффициентах теплоотдачи между газом, коксом и жидкими продуктами плавки, не поддается полному математическому описанию продолжительность пребывания чугуна и шлака между горизонтами перехода в жидкое состояние и уровнем фурм;
- проблематичность учета влияния неравномерности распределения компонентов шихты и газа, фракционного состава шихты на ход процессов теплообмена, восстановления оксидов, газификации углерода и др.;
- исключительная сложность решения системы нелинейных уравнений математической физики при различных граничных и начальных условиях и др.;
- обязательность введения существенных допущений, положенных в основу моделей этого класса, обусловленных необходимостью предварительного определения кинетических характеристик железорудного сырья и соответствующей параметрической настройки модели для конкретных условий доменной плавки, ограничивают их практическую применимость для решения задач текущего анализа, прогноза и управления ходом плавки;
- недостаточная изученность и сложность описания движения шихтовых материалов, расплава в доменной печи.

В основу модели теплового состояния современной доменной плавки положены закономерности теплообмена, разработанные Б.И. Китаевым и развитые его учениками. Эти закономерности научно обоснованы в работах по теплообмену в шахтных и доменных печах [11 – 13]. Перспективным для решения рассмат-

риваемых задач оказался натурно-математический подход, разработанный в Сибирском государственном индустриальном университете [18]. Применительно к доменному процессу этот подход использован в УГТУ-УПИ [19, 20]. Выполненными исследованиями установлено, что модель теплового состояния доменной печи в целом пригодна для решения задач контроля и анализа теплового режима этого агрегата. Однако были выявлены и недостатки: особенности дутьевого, газодинамического и шлакового режимов, неравномерность распределения материалов и газов не находили должного отражения в этой модели, что ограничивало область ее практического применения. Используя методологию системных исследований, последующее совершенствование модели доменного процесса путем учета особенностей газодинамического, дутьевого и шлакового режимов, реально доступной информации о работе доменной печи, значительно расширили возможности этой модели [19, 20]. Следует особо отметить, что при разработке моделей этих подсистем параметрической идентификации широко использовались достижения других ведущих отечественных научных школ в области исследования и математического моделирования доменного процесса, а также хорошо проверенные практикой эмпирические уравнения. Однако основой моделей этих подсистем остаются фундаментальные, физические представления о процессах доменной плавки.

В порядке объективности следует отметить, что в последние десятилетия активно разрабатываются и новые, формальные подходы к оценке состояния и управлению плохо структурированными технологическими процессами: экспертные системы и системы распознавания образов. При этом часто возникают проблемы, связанные с недостаточной изученностью некоторых процессов, что затрудняет создание аналитических моделей в рамках разрабатываемых систем управления. Не является исключением и доменное производство. Наряду с математическими моделями в качестве дополнительных подходов к решению задачи определения и прогнозирования состояния доменного процесса в последнее время применяются методы распознавания образов и моделирования знаний [4, 5]. Целесообразность использования этих методов обусловлена: во-первых, исключительной сложностью явлений, свойственных доменному процессу; во-вторых, существенным развитием теории моделирования знаний, теории распознавания образов; в-третьих, созданием мощных баз данных реального времени технологических параметров. Так, метод распознавания образов предназначен для моделирования зависимостей не на основе математических моделей процессов, имеющих знания (об этих зависимостях), а на принципах обучения, когда модель строится на основании анализа некоторого, достаточно большого статистического материала (обучающей выборки). Прогноз содержания

кремния в чугуне на предстоящем выпуске состоит в том, чтобы отобразить соответствующий вектор параметров плавки в пространство признаков и с помощью решающего правила установить, в области какого класса (низкое, нормальное или высокое содержание кремния) находится соответствующая точка. Решающее правило, полученное при использовании подсистемы признаков, показало 83 % правильного распознавания векторов экзаменуемой выборки [5].

**Выводы.** Для решения проблем создания современных информационно-моделирующих систем технологических процессов в металлургии необходимо совершенствование существующих и разработка новых компьютерных методов получения и оценки достоверности информации о состоянии технологического процесса; использование современных достижений в области математического моделирования, моделирования знаний, распознавания образов, теории и практики современной металлургии, теории управления при разработке автоматизированных систем управления; разработка на основе современных принципов соответствующего математического, алгоритмического и программного обеспечения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юсфин Ю.С. Металлургия чугуна. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
2. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.
3. Товаровский И.Г. Доменная плавка. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 765 с.
4. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спириин, Ю.В. Ипагов, В.И. Лобанов и др. – Екатеринбург: изд. УГТУ – УПИ, 2001. – 617 с.
5. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии / Н.А. Спириин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. – Екатеринбург: изд. УрФУ, 2011. – 462 с.
6. Девятов Д.Х., Каплан Д.С. Корпоративная информационная система металлургического предприятия. – Магнитогорск: изд. МГТУ, 2008. – 306 с.
7. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спириин, В.Л. Терентьев и др. – Екатеринбург: изд. УГТУ – УПИ, 2005. – 301 с.
8. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
9. Колесников А.А. Современная прикладная теория управления. – Таганрог: изд. ТРТУ, 2000. Ч. 1. – 400 с.; Ч. 2. – 559 с.; Ч. 3. – 656 с.
10. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Наука, Физматлит, 1997. – 320 с.
11. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Д. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1966. – 355 с.
12. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов и др. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
13. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спириин, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко – Екатеринбург: изд. УГТУ – УПИ, 1995. – 243 с.
14. Дмитриев А.Н., Шаврин С.В. // Сталь. 1996. № 12. С. 7 – 13.
15. Доброскок В.А., Кузнецов Н.А., Туманов А.И. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1985. № 3. С. 145, 146.
16. Мойкин В.И., Бабушкин Н.М., Боковиков Б.А. // Сталь. 1984. № 4. С. 9 – 14.
17. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. – М.: Наука, 1991. – 92 с.
18. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев и др. – Кемерово, М.: Изд. объединение «Российские университеты»: Кузбассвузиздат – АСТШ, 2008. – 487 с.
19. Загайнов С.А., Онорин О.П., Гилева Л.Ю. // Сталь. 2000. № 9. С. 12 – 15.
20. Развитие трехуровневых АСУ ТП в металлургии (коксовые и бескоксовые процессы) / В.Г. Лисиенко, Е.Л. Суханов, В.А. Морозова и др. – М.: Теплотехник, 2006. – 328 с.

© 2012 г. В.Ю. Рыболовлев, А.В. Краснобаев,  
Н.А. Спириин, В.В. Лавров  
Поступила 23 марта 2012 г.