

Создание системы автоматического ведения плавки в ДСП как первый шаг развертывания интеллектуальных систем управления в сталеплавильном производстве

*А.В. Старосоцкий, А.К. Бабичев, И.В. Деревянченко и др.
Труды шестого конгресса сталеплавильщиков –*

Интенсификация технологических процессов в электросталеплавильном производстве в условиях жестких требований к их технико-экономическим показателям требует привлечения высококвалифицированного и опытного технологического персонала, однако рынку труда становится все труднее справляться с этой задачей. Аккумуляция знаний и опыта, накопленных металлургической наукой, в системах управления является одним из средств её решения. Системы управления, построенные на этой основе называют интеллектуальными, или основанными на знаниях (Knowledge Based Systems).

Цель статьи – изложить принципы построения системы автоматического ведения плавки (САВП) на базе пакета ОРАКУЛ [1-4] в составе систем управления технологическими процессами электросталеплавильного цеха Молдавского металлургического завода.

Работа по ее созданию основывается на следующих предпосылках:

1. Металлургическая наука располагает обширным опытом теоретического описания сталеплавильных процессов, предложено большое число математических моделей, в той или иной мере суммирующих этот опыт.
2. Имеется широкий выбор технических и программных средств, с помощью которых созданы эффективные системы базовой автоматизации в электросталеплавильном производстве.
3. В отечественной и зарубежной металлургии накоплен опыт разработки и успешного применения отдельных программно-технических модулей, которые могут служить элементами системы автоматического ведения плавки.
4. Авторам статьи пока неизвестны примеры реализации целостной системы такого рода в сталеварении.

В качестве исходных данных для работы САВП может быть использовано формализованное задание на плавку. В общем случае задание на плавку САВП включает:

- характеристика подлежащей выпуску марки стали;
- характеристика механизмов и устройств, применяемых в конкретном электрометаллургическом процессе;
- характеристика используемых материалов и энергоносителей;
- дополнительные условия и данные, необходимые для оптимизации конкретного технологического процесса.

Формализация марки стали в том или ином виде выполняется практически на каждом металлургическом предприятии. В качестве формализованной характеристики марки стали, например, используются технологические карты и их представление в технологической базе данных. Преобразование такой формы в необходимый для самой САВП производится дополнительно. Система ОРАКУЛ на ММЗ использует следующие данные из технологической карты:

- температура выпуска стали из печи в зависимости от способа ее дальнейшей обработки;
- допустимый состав стали на выпуске;
- плановая таблица металлозавалки.

Форма представления характеристик механизмов и устройств, применяемых в электрометаллургии, в общем случае содержит следующее:

- наименование и назначение устройства (исполнительного механизма);
- наименование (код) материала (энергии), вносимого данным устройством;
- предельные и эффективные интенсивности ввода соответствующего вещества (энергии) устройством (разовые порции отдачи, например, для устройств, поставляющих сыпучие материалы);
- характеристика периодов плавки, в которых допускается работа данного устройства, исходя из конструктивных особенностей устройства и печи, применяемой на конкретном предприятии технологии, требований техники безопасности и накопленного на предприятии опыта использования данного механизма (устройства);
- характеристика дополнительного воздействия на ход технологического процесса в результате применения данного устройства.

Приблизительно так описано понятие «устройство» в блоке проектирования плавки системы ОРАКУЛ на ММЗ. При формализации характеристик самой печи (ковша) кроме указанных выше параметров используется понятие «геометрические и конструктивные особенности печи», которые позволяют, например, определить момент начала удаления шлака из печи (ковша) (самотеком, либо принудительно) и рассчитать массу удаленного из печи (ковша) шлака, используя эту информацию и в тепловой модели.

Описание используемых материалов и энергоносителей должно содержать информацию:

- о фактическом или среднестатистическом (например – для видов лома) химическом составе;

- о стоимости и/или условном коэффициенте, характеризующем ценность данного материала (энергоносителя) для конкретного предприятия в конкретных условиях (исходя, например, из запасов материала (энергоносителя) на предприятии и возможностей пополнения этого запаса);
- о коэффициентах (определяемых, как правило, опытным путем в период внедрения модуля прогнозирования фактического состояния), характеризующих время и объем усвоения данного материала (энергоносителя) на конкретном агрегате технологической линии производства стали.

Особое место среди используемых материалов занимает лом, так как:

- точный фактический химический состав лома, поступившего в печь всегда неизвестен, приходится довольствоваться лишь приближенным среднестатистическим составом каждого вида лома;
- в качестве элемента задания на плавку в систему моделирования зачастую поступает информация не о фактическом весе и видах лома, а лишь рекомендуемая таблица шихтовки, либо статистический анализ использования лома для выплавки данной марки стали на данном предприятии. На основании этой информации первоначально и будет работать система моделирования плавки, а по мере поступления информации о фактическом весе и видах лома, подаваемых в печь, будет осуществлен перерасчет.

Система оптимизации ориентирована на выпуск плавки с минимальной себестоимостью тонны жидкого металла. Дополнительные требования, как элемент задания на плавку, будут зависеть от особенностей конкретного производства. В качестве дополнительных условий оптимизации для системы ОРАКУЛ на Молдавском металлургическом заводе планируется реализовать (а частично уже реализованы), например, такие:

- выпустить плавку к назначенному сроку (в том числе и в кратчайший срок);
- выпустить плавку с минимальным или максимальным использованием того или иного энергоносителя или материала.

Иначе говоря, задание на плавку определяет что, какими средствами и в каких условиях должна сделать САВП.

Для нормального функционирования САВП необходимо определить минимальный и рациональный объемы информации о ходе технологического процесса. В качестве рационального объема предложен следующий перечень информации:

- вид и вес каждого вида лома в каждой подвалке (завалке) и время поступления каждой корзины лома в печь, а так же температура лома в момент поступления его в печь;
- вес каждого поступившего в печь (ковш) материала и энергоносителя при каждой отдаче и нарастающим с момента начала плавки итогом от каждого устройства (механизма);
- вес стали в ковше при отдаче каждой порции материалов на сливе;
- информация о времени и результатах фактических замеров температуры жидкой стали и отборов проб;
- информация о времени начала и окончания основных этапов плавки;
- моменты подъема (опускания) и отведения (наведения) свода;
- время начала и окончания выпуска (слива) стали;
- информация о температуре и объеме отводимого из печи газа и содержании в нем CO и CO₂;
- информация о работе системы охлаждения элементов печи:
- температура охлаждаемых панелей и подины;
- расход и входная и выходная температура охладителя (воды);
- информация о наклоне печи и/или других событиях, влияющих на изменение ее эффективного объема;
- массе шлака и жидкой стали, оставшейся в печи после выпуска плавки.

Следует отметить, что получить достоверную информацию о массе «болота» крайне затруднительно. В системе ОРАКУЛ на ММЗ используются расчетные (а не измеренные) значения массы болота и шлака, оставшиеся в печи после выпуска предыдущей плавки, для чего постоянно отслеживается вес металла в ковше на сливе и изменение «геометрических и конструктивных параметров» печи по ходу всей плавки (например – наклон печи).

Приведенный выше перечень информации может оказаться избыточным или недостаточным для других САВП. В нашем случае он отражает текущие потребности системы ОРАКУЛ и частично Автоматизированной системы формирования паспорта плавки на Молдавском металлургическом заводе.

Особое значение для САВП имеет эффективный модуль определения этапов плавки и текущего состояния процессов в печи по прямым и косвенным признакам, например – по спектрам тока или напряжения дуги. На ММЗ ведётся работа по созданию модуля мониторинга технологического процесса на основе методов распознавания образов. Его интеграцию в систему ОРАКУЛ планируется осуществить в ближайшее время.

Вид управляющих воздействий на механизмы и устройства определяется формализованными характеристиками устройства в задании на плавку. Как правило, это интенсивность отдачи в печь присущего конкретному устройству материала (энергоносителя). Для сыпучих материалов можно использовать разовые дозы отдачи материала.

В качестве аппаратных средств базовой автоматизации, непосредственно управляющих устройствами очень часто используются контролеры. По мнению авторов статьи предпочтительнее использовать с этой целью средства, предоставляемые изготовителями промышленных компьютеров и УСО для них.

Подробнее необходимо сказать о месте регулятора тока в системе САВП и организации взаимодействия с ним.

1. Регулятор тока (мощности, импеданса) является составной, очень важной частью базовой автоматизации, обеспечивающей работу системы автоматического ведения плавки.
2. Основная задача регулятора – обеспечить эффективное использование мощности трансформатора. Для этого современный регулятор должен обладать своими вычислительными ресурсами.
3. В число функций регуляторов тока часто пытаются включать задачи проектирования плавки и оптимизации процессов («энерготехнологическое» направление). Очень хочется верить, что производители таких регуляторов сумели достичь требуемой компетенции в вопросах не только использования электрических устройств, но и в вопросах компьютерных технологий и металлургии в целом.

Представляется целесообразным следующее взаимодействие регуляторов тока с системой моделирования:

1. Регулятор в качестве задания принимает от системы моделирования в удобном для него виде, уставку, характеризующую мощность, которую необходимо подвести в печь от трансформатора, и выполняет это задание;
2. Регулятор выполняет любые доступные ему операции, необходимые для адекватного выполнения полученного задания, не дублируя работу САВП. Другие системы базового уровня автоматизации поставляют регулятору необходимую для этого информацию;
3. Регулятор передает (если он способен это сделать) в систему моделирования информацию о полученном задании и о текущих гармонических составляющих и среднеквадратичных значениях тока и напряжения.

Ядром системы автоматического ведения плавки является система моделирования, способная:

- отслеживать и прогнозировать текущее состояние процессов на агрегатах, участвующих в ведении плавки, и отображать их;
- проектировать плавку исходя из фактического или расчетного текущего состояния процесса и задания на плавку;
- выдавать управляющие воздействия устройствам, применяемым при ведении плавки, и рекомендации технологическому персоналу по применению технологических устройств, недоступных по той или причине для непосредственного управления САВП;
- участвовать в предварительном «лабораторном» проектировании плавки для отработки новых технологических приемов и прогнозировании эффекта от применения новых материалов и технологических устройств;
- осуществлять расчет перспективных оптимальных потребностей конкретного сталеплавильного производства в материалах и энергоносителях, используемых в технологических процессах.

Исходя из перечисленных выше задач ядра, в нем условно можно выделить несколько модулей:

- модуль тепловой модели;
- модуль расчета текущего состояния и прогнозирования;
- модуль проектирования плавки;
- модуль планирования потребностей производства.

При такой структуре ядра его модули решают следующие задачи:

1. Модуль тепловой модели:
 - расчет температуры стали;
 - расчет доли расплавленной шихты.
2. Модуль расчета текущего состояния и прогнозирования:
 - расчет химического состава стали;
 - расчет химического состава шлака;
 - расчет условного химического состава нерасплавленной шихты;
 - расчет массы сошедшего шлака;
 - расчет массы жидкой стали;
 - расчет массы и состава шлака и болота, остающегося в печи после выпуска плавки;
 - расчет ожидаемых технико-экономических показателей плавки;
 - поиск экстремума целевой функции.
3. Модуль проектирования плавки:
 - расчет и выдача управляющих воздействий для всех устройств в ходе процесса выплавки стали, необходимых для выполнения задания на плавку;
 - оптимизация расхода материалов и ресурсов в соответствии с заданием на плавку.
4. Модуль планирования потребностей производства:
 - расчет заявки на поставку материалов и энергоресурсов, исходя из перспективного плана производства;

- оценка эффективности применения альтернативных видов материалов и энергоресурсов для выплавки заданных марок стали.

Условность в данной трактовке назначения каждого из модулей ядра САВП заключается в том, что любая из задач ядра САВП решается не отдельным модулем, а в тесном взаимодействии нескольких, а иногда и всех, модулей ядра. Так, например, модуль расчета текущего состояния и прогнозирования не сможет обеспечить должной точности без достоверной информации от тепловой модели. Модуль проектирования плавки, не только использует результаты работы тепловой модели и модуля расчета текущего состояния и прогнозирования в качестве исходных данных для работы, но и неоднократно «привлекает» эти модули в процессе поиска оптимального способа выполнения задания на плавку.

Упрощенная структурная схема системы ОРАКУЛ, используемой в качестве ядра САВП ОРАКУЛ, представлена на рис. 1 и описана ниже:

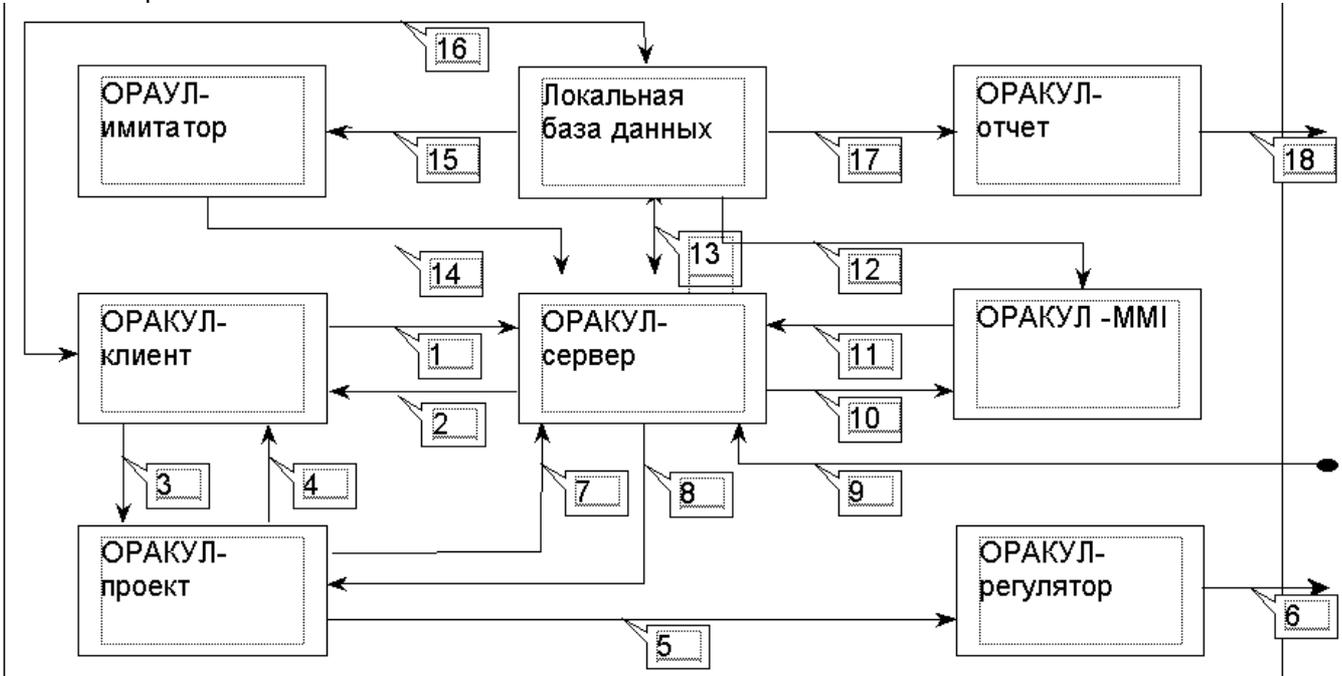


Рис.1 Упрощенная структурная схема системы ОРАКУЛ на ДСП-2 ММЗ.

1. ОРАКУЛ-клиент – один из основных расчетных модулей системы. В рамках этого процесса выполняется тепловая модель и расчет текущего химического состава стали, шлака и отходящих газов. Необходимая для расчетов информация запрашивается у ОРАКУЛ-сервера (связь 1). Процесс планирует свою работу и работу модуля ОРАКУЛ-проект (связь 3 – разрешение работы процесса ОРАКУЛ-проект, связь 4 – получение информации о результате расчета). В качестве исходного материала для расчетов может служить не только текущая информация о ходе процессов на агрегатах электросталеплавильного производства (эта информация поставляется ОРАКУЛ-сервером - связь 2), но и «историческая» информация о ходе прошедших плавки, получаемая из локальной базы данных (связь 16). Это удобно при отладке ядра, т.к. ОРАКУЛ-клиент поддается настройке.
2. ОРАКУЛ-проект на основании информации о текущем состоянии процессов выполняет расчет оптимальных управляющих воздействий для всех устройств, участвующих в производстве стали на данном агрегате, для достижения заданного результата. Задание на плавку запрашивается у ОРАКУЛ-сервера (связь 7). Содержание задания на плавку, передаваемого ОРАКУЛ-сервером (связь 8) было описано выше. Результаты расчета передаются ОРАКУЛ-регулятору (связь 5).
3. ОРАКУЛ-регулятор осуществляет преобразование управляющих воздействий, рассчитанных ОРАКУЛ-проектом в вид, воспринимаемый устройствами сталеплавильного агрегата (непосредственно или при участии системы базовой автоматизации – связь 6).
4. ОРАКУЛ-сервер – основной процесс, обеспечивающий взаимодействие расчетных модулей с системами базовой автоматизации, технологической базой данных и оператором системы. Получая запросы от процессов системы (связи 1, 7, 11), ОРАКУЛ-сервер готовит соответствующую информацию и передает ее потребителям. Кроме того, этот процесс ведет запись в локальную базу данных информации о работе системы в ходе плавки (связь 13). Эта информация может быть в дальнейшем использована, например, для формирования некоторых отчетных форм с помощью ОРАКУЛ-отчета.
5. ОРАКУЛ - ММИ (man machine interface) предназначен для оперативной и «исторической» визуализации технологического процесса в том виде, каким он представляется системе ОРАКУЛ. Так как система конфигурируема и настраивается под конкретные условия производства, то ОРАКУЛ-ММИ служит и для обеспечения взаимодействия технологического персонала с системой в целом в процессе настройки и подстройки.

6. ОРАКУЛ-имитатор позволяет в реальном масштабе времени «проиграть» записанные ранее ОРАКУЛ-сервером плавки. Это удобно и для настройки системы, и для анализа действий системы (и/или технологического персонала) в ходе плавки, и для обучения персонала.

К достоинствам такой структуры можно отнести ее модульность. Так, например, в приведенной выше схеме отсутствует модуль планирования потребностей производства, так как на Молдавском металлургическом заводе решили пока не заниматься его внедрением. В ближайшее время планируется создать модуль ОРАКУЛ - тренажер, предназначенный, например, для обучения и аттестации технологического персонала.

На основе варианта системы ОРАКУЛ на ММЗ создан, так называемый, «Редактор хода плавки», позволяющий реализовать режим «что если». С помощью данного модуля можно проанализировать ход уже прошедших плавков или создать на их основе или «с нуля» проект ведения новых плавков. Этот модуль применим, например:

- для отработки новых технологических приемов ведения плавки;
- для анализа обоснованности применения существующего или планируемого к установке устройства и механизма;
- для оценки эффективности применения новых шихтовых материалов;
- для создания «шаблонов» ведения плавки в системах, построенных по «командно-аппаратному» принципу (следует еще раз подчеркнуть, что система ОРАКУЛ к таковым не относится).

Построение эффективной системы автоматического ведения плавки невозможно без учета следующих факторов, определяющих выбор программных и аппаратных средств для реализации САВП:

1. Периодичность получения и выдачи управляющих воздействий механизмам и устройствам, а также скорость обработки необходимой информации должна соответствовать скорости процессов в реальной плавке;
2. Ритмичность производства и качество продукции во многом будут зависеть от устойчивости и восстанавливаемости каждой составляющей части системы;
3. Возможность дальнейшего развития, модернизации и наращивания системы в целом должна закладываться на каждом этапе ее создания.

Уважая выбор каждого предприятия и разработчика, хочется отметить, что с точки зрения авторов данной статьи оптимальный на сегодняшний набор программно-аппаратных средств, на котором необходимо строить САВП, следующий:

1. Промышленные компьютеры и устройства связи с объектами (УСО) семейства Advantech и подобные, так как поддержка ими принципа «открытой архитектуры» (в отличие от большинства контроллеров) позволяет:
 - использовать стандартные средства разработки программного обеспечения, а значит и облегчить организацию взаимодействия между разными программно-аппаратными комплексами;
 - уменьшить зависимость системы от технической и маркетинговой политики отдельных производителей аппаратных средств.
2. Операционная система реального времени QNX с протоколом FLEET для обеспечения межзадачного обмена, так как ни одна из других известных сегодня авторам статьи операционных систем пока не может обеспечить сопоставимого уровня быстродействия, устойчивости и «масштабируемости» в системах управления технологическими процессами.
3. Технологическая база данных на основе Sybase SQL Anywhere, графический интерфейс пользователя Photon, компилятор Watcom C/C++, так как именно эти программные продукты позволяют использовать возможности операционной системы QNX в системах управления технологическими процессами в полном объеме;
4. Система ОРАКУЛ в качестве ядра САВП, об особенностях и достоинствах которой подробнее можно узнать из [1-4], кратко, выполняет следующие функции:
 - адекватно оценивает состояние процессов на агрегатах технологической линии электросталеплавильного участка в текущий момент, а также в ретро- и перспективе;
 - вырабатывает оптимальные рекомендации и управляющие воздействия для перевода процессов из текущего в назначенное состояние;
 - использует объективно-необходимый минимум статистической информации, основываясь, прежде всего, на строгом термодинамическом расчете состояния системы «металл-шлак-газ» в масштабе реального времени.

Попытки построить эффективную систему автоматического ведения плавки за счет статистических моделей и наращивания ресурсов аппаратных средств бесперспективны, если при этом не обеспечить применение эффективных методов анализа и расчетов, их программную реализацию и адекватное использование.

Своеобразие внедрения САВП состоит в том, что это не изолированный объект, сдаваемый «под ключ», а поэтапная автоматизация интеллектуального труда лиц, принимающих решение (ЛПР) [5], начиная от сталевара. Развертывание подобной системы должно предполагать окупаемость на каждом этапе и широкое вовлечение в процесс ее создания персонала конкретного предприятия.

Организационные аспекты внедрения такой системы должны включать:

- принятие решения о создании САВП и определение ее места и задач в существующей и перспективной технологии, формулировка принципов реализации САВП;
- самостоятельная или во взаимодействии с экспертами оценка реальных возможностей существующего парка контрольно-измерительных устройств, исполнительных механизмов, программных и аппаратных средств;
- самостоятельная или во взаимодействии с экспертами оценка реальной структуры и возможностей подразделений предприятия, занимающихся технологическими процессами и их автоматизацией, а так же степени их взаимодействия;
- оценка необходимости и возможности привлечения к работе представителей специализированных организаций, определение форм участия подобных организаций в совместной работе и выбор таких организаций;
- изменение (при необходимости) существующей структуры «команды», участвующей в создании САВП без остановки производства;
- утверждение структуры САВП, комплексного плана работ и финансирования для ее реализации, составленных в результате проведения указанных мероприятий, назначение сроков реализации и ответственных;
- контроль над исполнением и финансированием плана работ;
- анализ эффективности выполненных на каждом этапе мероприятий и корректировка общего плана работ по результатам этого анализа;
- формирование технического задания на очередной этап.

Утвержденная структура САВП прежде всего должна содержать информацию:

- об исполнительных механизмах и контрольно-измерительных устройствах;
- о средствах базовой автоматизации и системах нижнего уровня автоматизации (прежде всего PLC – programmable logical controllers на базе микроконтроллеров, контроллеров и/или промышленных компьютеров);
- о системах управления процессами (PCS - process control systems);
- о базе данных;
- о средствах визуализации и взаимодействии с технологическим персоналом (MMI – man-machine interface).
- о взаимодействии всех составляющих системы;
- о взаимодействии систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) с существующей или перспективной системой управления производством (АСУП).

* * *

В ближайшие годы следует ожидать интенсивного развития интеллектуальных систем управления, направленных на реализацию наиболее продуктивной функции компьютерных АСУ – оптимального управления.

Отличительной особенностью таких систем является наличие ядра в виде модели, суммирующей обширный круг предметных знаний, относящихся к функционированию объекта управления. Первым шагом развёртывания интеллектуальной системы на сталеплавильном предприятии, на наш взгляд, должна быть создана система ведения плавки в автоматическом режиме (САВП).

В статье изложены практические аспекты построения такой системы, принятые на ММЗ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Пономаренко А.Г. Термодинамическая модель плавки и проблема построения детерминированной модели сталеплавильного процесса. // *Металлы*. – 1992, №1, с.42-48.
2. Храпко А.С. Термодинамическая модель системы металл – шлак – газ для АСУ и машинных экспериментов по оптимизации технологии сталеплавильного процесса.: Дисс канд. техн. наук. – Донецк.: Донецк. политех. институт, 1990.
3. Храпко С.А., Иноземцева Е.Н., Харченко А.В. Термодинамическая модель системы металл-шлак-газ и интегрированная система «Оракул»: использование для прогнозных расчётов и управления в составе АСУТП и разработки сталеплавильных процессов. – В кн.: Тезисы докладов «Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии». – Новокузнецк, 1991. С. 222 — 223.
4. Пономаренко А.Г., Гуляев М.П., Деревянченко И.В., Храпко С.А. и др. Промышленное освоение компьютерного управления выплавкой стали на БМЗ и ММЗ на основе физико-химической модели «ОРАКУЛ». // *Труды пятого конгресса сталеплавильщиков*. – Москва. – 1999.
5. Производственные системы с искусственным интеллектом / Алиев Р. А. и др. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.