

УДК 669.162.2:681.5

**В.И.Большаков, И.Г.Муравьева, Д.Н.Тогобичкая, Н.М.Можаренко,
Н.Г.Иванча, Ю.С.Семенов**

**АНАЛИЗ ОПЫТА СОЗДАНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ
И ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ
ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ**

В работе представлен анализ известных информационно–моделирующих систем (экспертных систем), показано отличие выполняемых ими функций, уровня технического, математического и информационного обеспечения, а также иерархической структуры. Приведены особенности разрабатываемой интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой. Интеллектуальная система включает ряд математических моделей, в частности: дутьевого и газодинамического режима плавки; распределения компонентов шихтовых материалов в зонах сечения колошника, опускания шихтовых материалов в сухой зоне печи, распределения элементов шихты между продуктами плавки

доменная плавка, анализ, иерархическая структура, экспертная система, интеллектуальная система

Современный уровень информационного оснащения доменных печей средствами и системами автоматизированного контроля, с одной стороны, расширяет возможности оценки оператором процессов плавки, а с другой – затрудняет принятие им решений по управлению ходом печи, т.к. поступающая от средств и систем информация имеет свои критерии оценки ситуации и для принятия решений по управлению необходим комплексный подход к анализу всей информации о ходе процесса плавки. Как показали результаты исследований, время, которым располагает оператор для анализа процессов в печи, составляет примерно 8% от продолжительности смены [1]. Эффективность управляющих воздействий на ход процессов 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). Применяемые системы отличаются набором выполняемых функций, уровнем технического, математического и информационного обеспечения, а также иерархической структурой [2,3].

Первые мощные автоматизированные системы управления доменной плавкой, основанные на использовании моделей технологических процессов, экспертных систем и других методов из области искусственного интеллекта, разработаны крупнейшей финской компанией Ruukki (ранее Rautaruukki) и совместно двумя австрийскими компаниями - машино-

строительной компаний «Voest-Alpine Industrienanlagenbau (VAI)» и производителем стали «Voest-Alpine Stahl Linz (VASL). Система получила распространение на рынке под торговой маркой VAiron [4,5,6]. Эти системы установлены разработчиками в конце 1970-х годов на двух предприятиях [4].

С 1979 г. компания Ruukki установила около 50 систем типа Rautaruukki Blast Furnace Supervision System (BFSS), Rautaruukki Blast Furnace Expert System (BFES), Rautaruukki Blast Furnace Neural System (BFNS) [4]. Перечисленные системы BFSS, BFES и BFNS являются чисто «советующими экспертными системами» (advisory expert systems), рекомендации которых постоянно проверяются оператором перед исполнением.

Компания Siemens VAI довела к 1991 г. версию «Vairon Process Optimization System» до рыночной кондиции и установила с того времени около 30 систем в различных странах мира.

В апреле 2004 г. компания Siemens VAI приобрела у фирмы Rautaruukki разработку и право на ее реализацию для оптимизации доменного процесса. В числе преимуществ системы Rautaruukki Blast Furnace Expert System (BFES) следует выделить следующие ее особенности [4]. Экспертная система осуществляет непрерывный анализ производственного процесса. В случае нарушения технологического режима экспертная система моментально выдает рекомендации по принятию корректирующих мер. Это позволяет повысить стабильность работы печи, эффективность плавки, а также сократить производственные затраты. Производственный персонал освобождается от выполнения рутинных задач, например, постоянного контроля параметров измерений. В связи с этим он может сконцентрировать свое внимание на непредвиденных ситуациях, принять своевременное решение для внесения изменений в технологический процесс (Advisory System – обучающая система или Open Loop Expert System – экспертная система с открытым контуром управления). В экспертной системе происходит сопоставление технологических параметров и результатов моделирования, т.е. выполняется анализ всех имеющихся данных с выдачей полезной информации. Таким образом, производственный персонал расширяет свои знания о доменной плавке. Полученные в ходе эксплуатации печи знания, опыт инженеров–технологов и обслуживающего персонала сохраняются в экспертной системе и доступны для пользования в любое время.

Названные преимущества в полной мере относятся и к экспертной системе Vairon. Система Vairon претерпела несколько этапов развития. Сначала в 1992 г. на ДП–А фирмы Voest-Alpine Stahl Linz была установлена консультационная экспертная система, которая в дополнение к анализу данных технологического процесса и способности прогнозировать некоторые явления доменного процесса предлагала оператору выполнить определенные действия по управлению [7]. При этом окончательное ре-

шение принимал оператор [8]. В декабре 1996 г. система была модернизирована до уровня экспертной системы с замкнутой обратной связью в реальном времени, функции которой выходят далеко за пределы только рекомендаций по оптимизации процессов [5]. Основанная на расширяемой пользователем базе знаний экспертная система с замкнутой обратной связью в реальном времени анализирует технологический процесс, обеспечивает управление с замкнутой обратной связью в реальном времени, предлагает корректирующие действия и подробно описывает, каким образом были получены результаты. Многочисленные действия (регулирование расхода кокса, основности, вдувания пара и т.п.) выполняются в замкнутом контуре без взаимодействия с оператором. Дальнейшей стадией расширения возможностей системы, проводимого с июля 1999 г., явилось развитие модели распределения шихты с целью возможности настройки в замкнутом контуре матрицы загрузки (charging matrix) для оптимизации распределения газового потока в печи. Экспертная система оказывает содействие в определении правильного распределения шихты. Данный режим называется «Режим замкнутой обратной связи в реальном времени/Регулятор распределения шихты» и является конечной поставленной целью. В феврале 1999 г. был также включен в работу «Режим точной регулировки», в котором фактическая матрица загрузки регулируется посредством использования автоматически адаптируемой модели распределения шихты. В «Режиме замкнутого контура» экспертная система также подбирает оптимальный тепловой режим путем использования базы опытных данных. Впервые в мире реализована система с задачей основных технологических параметров в замкнутом контуре регулирования (Closed Loop Expert System). Кроме того, система проверяет и анализирует в режиме реального времени параметры загрузки доменной печи, состав и основность шихты, а также режим ее опускания внутри шахты, газовые потоки, распределение температуры и давления, данные о чугуна и шлаке, характеристики колошниковога газа и др. На основании этих данных, например, вырабатываются рекомендации о расходе восстановителей, составе шихты, о требуемом количестве пара или кислорода для обогащения дутья. Все эти регулирующие параметры циркулируют в замкнутом контуре полностью в автоматическом режиме без вмешательства оператора. Система Vairon анализирует фактическое состояние печи и осуществляет при необходимости корректирующие действия для стабилизации технологических параметров и, следовательно, улучшения производительности процесса. Vairon – первая экспертная система, которая функционирует полностью в автоматическом режиме, т.е. без вмешательства со стороны операторов. В экспертной системе происходит сопоставление технологических параметров и результатов моделирования, т.е. выполняется анализ всех имеющихся данных с выдачей полезной информации.

В настоящее время обе системы – «Vairon Closed Loop Expert System» и «VAIF Blast Furnace Expert System» (ранее «Rautaruukki BFES») – являются мировыми лидерами. С их помощью контролируется и управляется более 10% мирового производства чугуна [4]. Обе системы подтвердили свою практическую пригодность на многочисленных агрегатах. Прежде всего, они выполняют типичные функции диагностических систем, первая задача которых состоит в контроле состояния доменной печи. В качестве следующей предлагается одна или несколько мер для предупреждения расстройства хода печи (например, изменение расхода кокса, влажности дутья и др.). Третья и последняя задача – это предоставление пользователю разъяснений предлагаемых мер. Целью данной задачи является предложение оператору и инженеру–технологу максимально возможного объема информации для принятия обоснованного решения по соответствующим корректирующим мерам. Кроме того, система Vairon планировалась для полностью автоматического режима работы доменной печи, поэтому с самого начала она проектировалась в экспертном режиме с замкнутым контуром регулирования (Closed Loop), а не с открытым (Open Loop Advisory Mode).

Опыт эксплуатации обеих систем был учтен при разработке новой модульной системы Vairon TNG, которая объединяет сильные стороны обеих систем. Решение об использовании шихтовых материалов пониженного качества было одной из основных причин для разработки системы Vairon TNG. По мнению авторов статьи [4], только при полномасштабной автоматизации технологического процесса можно контролировать и эффективно эксплуатировать доменную печь в данных условиях.

Первоначальная структура системы Vairon полностью интегрируется в философию автоматизации Siemens VAI, в связи с чем прежняя структура системы была сохранена в новой системе. Первый уровень – управление технологическими параметрами. Эти конфигурируемые компоненты отвечают за коммуникацию с внешним миром (уровень 1 системы), труд (уровень 2 системы), кадры (уровень 3 системы), за сохранение всех регистрируемых данных, а также за презентацию данных пользователю (графические поверхности пользователя, печатные сообщения, PDA, мобильная связь и др.). Управление технологическими данными в системе Vairon TNG в основном идентично первоначальной версии системы.

Второй уровень образуют технологические модели. Модель расчета шихты определяет требуемый состав в зависимости от результатов химического анализа железорудных материалов и целевых значений расхода восстановителя и основности шлака. Перед каждым изменением состава шихты необходимо проводить подобный расчет. При использовании экспертной системы данная модель запускается самой системой. В зависимости от режима эксплуатации пользователь должен подтверждать результаты, прежде чем они будут переданы на уровень 1.

Модель распределения шихты отображает структуру слоев шихтовых материалов в верхней части доменной печи. Изменения в программе загрузки при наличии замкнутого контура определяются полностью в автоматическом режиме.

Модель расчета количества дутья и требуемой для его подогрева температуры. Модель износа горна рассчитывает с использованием метода конечных элементов линию износа горна доменной печи.

Модель кинетики технологического процесса определяет внутреннее состояние печи без проведения измерений на основе метода конечных элементов. В настоящее время возможности модели расширяются до нестационарных осесимметричных расчетов шахты (двухмерное пространство, одномерное временное пространство) и до стационарного трехмерного пространства горна.

Модель массового и теплового баланса выполняет расчет баланса масс и тепла для определенного периода времени. Результаты позволяют сделать заключение о состоянии печи.

Модель верификации баланса определяет на основании сравнения измеренных и рассчитанных значений и их последующего анализа ошибку измерений. Данная модель позволяет расширить функциональные возможности предыдущей модели.

Модель индикаторов эффективности рассчитывает различные индексы, например Thermal Quality Index (TQ) и др., которые будут использоваться на следующей стадии для прогнозирования будущих состояний печи.

Третий, самый верхний уровень, представляет собой так называемый уровень знаний. Экспертная система Vairon с замкнутым контуром и нейронная сеть Vairon являются частью этого уровня. Экспертные системы используются только тогда, когда накоплен большой опыт эксплуатации, который можно выразить в правилах. Нейронные сети как обучающиеся системы хотя и могут регистрировать большое множество данных, тем не менее не могут выражать отношения между величинами в форме алгоритмов или в форме правил. Таким образом, обе системы используются для задач, которые не могут или тяжело выражаются алгоритмически и, следовательно, не решаются традиционными средствами автоматизации. Частично модели активируются самой системой (например, расчет шихты) или система обращается к последнему производственному расчету.

Принцип работы экспертной системы Vairon реализуется следующим образом:

- обработка измеренных данных и расчет различных параметров, например, индикаторов производительности, статистических показателей, моделей;
- анализ всех доступных данных (результаты расчетов моделей, измеренные значения, характеристики сырьевых материалов и чугуна,

произошедшие изменения в режиме работе печи и др.) для оценки фактической производственной ситуации, определения состояния агрегата и необходимости принятия корректирующих мер (например, изменение заданных величин);

- автоматический запуск соответствующей модели для преобразования корректирующего предложения в конкретную регулируемую величину системы управления, затем эти регулирующие величины могут выполняться непосредственно в системе управления;

- индикация результатов на графическом дисплее пользователя с просьбой о подтверждении (Advisory Mode – совещательный режим) или индикация результатов на графическом дисплее пользователя и моментальное исполнение действия или действий (Closed Loop – замкнутый контур).

Нейронная сеть Vaigon является частью экспертной системы Vaigon TNG и оказывает поддержку в процессе нахождения решения. Результаты сопоставляются с данными, полученными в ходе измерений и расчетов. Таким образом, нейронная сеть играет роль дополнительного «средства измерения», которое предоставляет новые данные о состоянии доменной печи. Кроме того, сеть производит сопоставление своих результатов с другими параметрами печи и позволяет устанавливать взаимосвязи, которые до этого не были известны. В нейронной сети применяются полученные с помощью средств измерений данные.

Нейронная сеть облегчает анализ температуры футеровки, построение профиля температур (измеренного над и при наличии поперечного измерительного зонда под подачей), а также распределение температуры в вертикальной плоскости. Распределение этого параметра и его изменение во времени являются важнейшей информацией для оценки состояния доменной печи. Последующие корректирующие меры, насколько это необходимо, часто зависят от распределения шихты и газовых потоков в шахте печи. В результате оценки профиля можно выявить такие эффекты, как образование каналов и зависание шихты. Асимметричное распределение температуры по периметру доменной печи может указывать на настылеобразование. Распределение температуры и газовых потоков непосредственно зависят также от состояния и формы пластичной зоны. В связи с этим оптимизация распределения шихты является очень важным аспектом при управлении работой доменной печи.

В 80-х годах прошлого столетия большое распространение экспертные системы получили в Японии [3]. Первая экспертная система, разработанная фирмой Nippon Still, была установлена для опытной эксплуатации на доменной печи №4 в Кимицу (1984 г.) и введена в промышленную эксплуатацию в 1986 г. В Японии многие компании разработали искусственный интеллект и экспертные системы для того, чтобы помогать и советовать персоналу в ходе эксплуатации печей [1].

Известна также система Sachel, которая представляет собой интеллектуальную систему диспетчерского управления (экспертную систему), разработанную компанией «Sollac» – французским поставщиком стали [1]. Эта система включает три уровня данных:

- ноу-хау и эмпирические данные, полученные на основе многолетнего опыта по управлению доменными печами;
- научные данные, содержащие объяснения и количественный анализ эмпирических знаний. Эти знания включают выводы исследований и результаты измерений физических и химических условий внутри печи. С помощью этих показателей могут быть скорректированы и усовершенствованы ранее созданные модели;
- сведения по эргономике, необходимые для конструирования человеко-машинного интерфейса, предназначенного для операторов доменных печей.

Система Sachel обслуживает все доменные процессы: подачу шихты, газораспределение, газопроницаемость, утечки охлаждающей воды, условия вскрытия летки, отслеживание температуры горна, теплоотдачу стенок печи, управление подачей горячего дутья фурмами, тепловой и масочный балансы, дренаж лещади, качество жидких продуктов.

В настоящее время система Sachel используется для мониторинга и контроля работы шести доменных печей компании Arcelormittal Group (две – в Фос-сюр-Мер, две – в Дюнкерке и две – в Лотарингии). К результатам применения ее в Фос-сюр-Мер можно отнести более ровный ход печи с надежным прогнозом; более высокую готовность оборудования, что увеличивает производительность (на 2%); повышенную безопасность эксплуатации установки и персонала; улучшение согласованности процессов и качества чугуна; продление срока службы оборудования, сокращение стоимости чугуна (на 1,5%); рентабельность инвестиций (примерно 2 евро/т чугуна). Система Sachel в большей степени система знаний, чем автоматизации, которая способна помогать специалистам в осуществлении контроля сложнейших технологических процессов. Способствуя повышению надежности и производительности, она постоянно контролирует различные показатели и выдает рекомендации операторам.

В России разработкой научных основ создания экспертных систем доменной плавки активно занимаются ученые ряда организаций: НПО «Черметавтоматика», Московского института стали и сплавов, Российского института искусственного интеллекта, Института системного анализа РАН, Института проблем управления, Уральского федерального университета (УГТУ – УПИ), Уральского отделения РАН и др. Наилучшие практические результаты достигнуты в этой области в России сотрудниками Научно – инженерного центра ассоциации содействия Всемирной лаборатории (г.Москва) [3]. Опробование первой отечественной промышленной экспертной системы реального времени «Интеллект доменщика», разра-

ботанной сотрудниками этого центра, осуществлялось в доменном цехе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» на доменных печах № 1,2,6,7 и 8 [9]. Сведения о дальнейшем использовании этой системы при управлении процессом отсутствуют.

Известна также автоматизированная система контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки (АСКОП ДП), разработанная под руководством В.М. Паршакова [10,11]. С целью повышения эффективности работы печи за счет снижения расхода кокса, повышения производительности печи и качества чугуна система реализует с помощью математических моделей следующие основные функции: контроль и анализ доменной плавки; оптимизацию режимов плавки, прогноз показателей плавки. В системе функционируют следующие подсистемы: «Расчет шихты», «Время пребывания», «Баланс», «Минимальный кокс», «Шахта», «Когезия», «Температура фурменных очагов», «Горн». Как следует из публикаций, система с 2006 г. начала поэтапно внедряться на доменных печах ОАО «ММК». Сведения о практическом применении этой системы в настоящее время в источниках технической информации отсутствуют.

Экспертные системы строятся, как правило, на логической основе. Логическая экспертная система представляет собой сочетание логической модели объекта и экспертного блока, обеспечивающего программную реализацию экспертного прогноза. В настоящее время экспертные системы, разработанные на базе технологических инструкций с дополнительными рекомендациями экспертов – доменщиков, представлены в виде тренажеров. Как показано в [12–14], один из таких тренажеров - экспертная система «Советчик доменщика» передан Чусовскому и Косогорскому металлургическим заводам.

Известна экспертная система [15], которая, помимо того, что может быть использована в качестве тренажера для повышения квалификации обслуживающего персонала, была внедрена в качестве тренажера в учебный процесс Московского института стали и сплавов

В учебном процессе используется также и разработанная Национальной металлургической академией Украины диалоговая система «Персональный компьютер доменщика», предназначенная для автоматизированного поиска рациональных в конкретных условиях плавки базовых режимов работы доменной печи, выполнения технологических расчетов, а также повышения квалификации операторов – технологов [16]. Система включает следующие подсистемы: «Шихта», «Загрузка», «Шлак», «Дутье», «Расчет», «Тренажер».

До прошлого года единственной в России экспертной системой, работающей в режиме прямого управления доменной плавкой, являлась система VAiron, реализованная на ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат». В настоящее время на доменной печи №7 Новолипецкого

металлургического комбината реализована система Sached. Сведения о работе этих систем в источниках информации отсутствуют.

Как следует из выполненного анализа, единственной в мире экспертной системой, функционирующей полностью в автоматическом режиме, является система Vairon TNG, созданная на основе объединения двух систем – «Vairon Closed Loop Expert System» и «VAIF Blast Furnace Expert System» (ранее «Rautaruukki BFES»). Система Vairon TNG основана на современных моделях процесса и экспертных системах на базе искусственного интеллекта. В то же время, по мнению большинства специалистов-доменщиков полностью автоматизировать доменный процесс невозможно. Поэтому высшим уровнем автоматизации процесса может являться работа автоматизированных систем, объединяющих математические модели и интеллектуальные системы в режиме советчика, т.е. поддержки принятия решений оператором, что позволяет исключить неадекватную реакцию операторов на нарушения в работе доменной печи.

Как следует из анализа, известные экспертные системы основаны на использовании математических моделей, уточнение и адаптация которых к конкретному объекту осуществляется с использованием информации, получаемой с помощью установленных на печи средств контроля.

В отличие от известных систем, разрабатываемая в ИЧМ интеллектуальная система предполагает возможность комплексной оценки состояния процессов плавки с помощью разрабатываемых целевых критериев, основанных на использовании основных информативных параметров и показателей плавки и выходных данных автоматизированных систем контроля, а также моделей, описывающих основные процессы доменной плавки. В значительной степени возможность разработки интеллектуальной системы связана с оснащением доменной печи №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» разработанными в ИЧМ системами автоматизированного контроля:

- системой «Разгар», контролирующей распределение температур в горне доменной печи, по характеру изменений которых осуществляется оценка состояния футеровки горна [18,19];

- системой «Шлак», которая осуществляет оценку и прогноз шлакового режима по составу загружаемой шихты и показателям дутьевого режима, устанавливает диапазоны изменения критериев качества шлака (физико-химических свойств – вязкости, энтальпии, поверхностного натяжения, интервала плавления, серопоглотительной способности), обеспечивающих выплавку кондиционного по S и Si чугуна, а также осуществляет контроль степени насыщения чугуна углеродом [20,21];

- стационарной системой измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике, обеспечивающей получение информации, на основе которой рассчитываются параметры состояния поверхности засыпи материалов [18, 22–25];

- системой контроля распределения дутья по фурмам [18].

Основываясь на отечественном опыте создания и применения перспективных систем контроля процессов доменной плавки [18–25] и с учетом зарубежного опыта создания экспертных систем [2,4,6], разрабатываемая интеллектуальная система будет включать следующие подсистемы, описывающие основные явления, свойственные доменной плавке:

- теплового состояния доменной печи;
- дутьевого и газодинамического режимов доменной плавки;
- шлакового режима;
- распределения потоков шихты и газов на колошнике печи.

Выделение подсистем из общей системы обусловлено особенностями их функционирования как самостоятельных подсистем. Полное аналитическое описание этих подсистем затруднительно, поэтому целесообразно дополнительно использовать эмпирические соотношения и целевые комплексные критерии (показатели). По мнению Е.И.Райха [17], комплексные показатели имеют достоинство, которое не позволяет заменить их статистической совокупностью составляющих их аргументов: кроме своей наглядности и технологической осмысленности, комплексные показатели представляют собой определенный вид взаимозависимости многих переменных, которую трудно (а иногда – невозможно) заменить эквивалентной корреляционной системой, вычисленной с соблюдением принципа суперпозиции.

Целевой функцией разрабатываемых критериев (в предварительном варианте названных критериями – распределения шихтовых материалов и газов на колошнике печи; теплового состояния доменной печи; газодинамического режима плавки, поведения материалов на различных горизонтах и оценки дренажной способности коксовой насадки) будет оценка соответствующих процессов плавки. При этом аргументами в критериях будут являться обоснованные параметры и показатели плавки, характеризующие описываемые процессы.

Для выбора управляющих воздействий на ход плавки интеллектуальная система будет включать ряд математических моделей, в частности: дутьевого и газодинамического режима плавки; распределения компонентов шихтовых материалов в зонах сечения колошника, опускания шихтовых материалов в сухой зоне печи, распределения элементов шихты между продуктами плавки и др.

Показателями (целевой функцией) технологической эффективности работы печи и информационной системы явятся удельный расход кокса, производительность печи, выход кондиционного чугуна по содержанию серы в чугуне, температура жидких продуктов плавки в соответствии с требованиями последующего сталеплавильного производства.

Заключение. Анализ известных информационно–моделирующих систем (экспертных систем) показал, что применяемые системы отличаются

набором выполняемых функций, уровнем технического, математического и информационного обеспечения, а также иерархической структурой. Основываясь на мнении специалистов – доменщиков можно заключить, что высшим уровнем автоматизации процесса может являться работа автоматизированных систем, объединяющих математические модели, базу знаний и показатели плавки в режиме советчика, т.е. поддержки принятия решений оператором, что позволяет исключить неадекватную реакцию операторов на нарушения в работе доменной печи. Приведены особенности разрабатываемой интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой.

1. *Эволюция современного доменного производства и внедрение прогрессивных инженерных решений* / Я.Кармайл, К.Тирьон, Р.Гоффин и др. – Сталь, 2006. – №12. – С. 8–14.
2. *Информационные системы в металлургии* / Н.А.Спирин, Ю.В.Ипатов, В.И.Лобанов и др. // Екатеринбург: Уральский государственный технический университет. – УПИ, 2001. – 617 с.
3. *Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки* / Н.А.Спирин, В.В.Лавров, В.Ю.Рыболовлев и др. // Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2011. – 462 с.
4. *Экспертные системы – новый уровень оптимизации работы доменных печей* / Й.Херл, М.Шалер, К.Штоль и др. – Черные металлы, 2007. – №9. – С. 37–43.
5. *Vairon blast furnace optimization* / H.Druckenthauer, B.Schurz, M.Schaler et al. //Steel Times. 2000. №8. С. 290 – 293.
6. *Инкала П.* Опыт эксплуатации экспертной системы в управлении доменными печами в фирме «Раутаруукки» / П.Инкала, А.Карппинен, М.Сеппянен–Сталь, 1994. – №9. – С. 7–12.
7. *The Fully Automatic Blast furnace – only a Vision?* / G.Brunnbauer, B.Rummer, H.Nograting et al. – Ironmaking Conference Proceedings, 2001. – №3. – P.677–688.
8. *Друкентанер Г.* Система оптимизации работы доменной печи «VAIRON» – экспертная система / Г.Друкентанер, Б.Шюрц, М.Шалер – Черные металлы, 2000. – №6. – С. 64–72.
9. *Экспертная система для диагностирования и регулирования хода доменной печи* / В.И.Соловьев, В.А.Краснобаев, Ю.А.Сарапулов, Е.А.Павлова – Теория и практика производства чугуна, труды международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь», 2004. – С. 484–487.
10. *Паршаков В.М.* Автоматизированная система контроля, анализа оптимизаций и прогноза доменной плавки / Сборник трудов V международного конгресса доменщиков «Производство чугуна на рубеже столетий», Днепропетровск: «Пороги», 1999. – С. 477–478.
11. *Паршаков В.М.* Внедрение на доменных печах ОАО «ММК» автоматизированной системы контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки / -Сборник

- трудов V международного конгресса по агло–коксо–доменному производству», Ялта, 2012, май. – С. 274–307.
12. *Экспертная система (тренажер) мастера доменной печи* / В.П.Чистов, А.Е.Пареньков, Ф.Л.Скуридин и др. – Сборник трудов II международной конференции доменщиков, Днепропетровск, 18 – 22 мая, 2009 г. – С. 155 – 158.
 13. *Построение логических экспертных систем для управления технологическими процессами в доменных печах* / В.Г.Лисиенко, А.Е.Пареньков, Ф.Л. Скуридин и др. – Сборник трудов V международного конгресса доменщиков «Производство чугуна на рубеже столетий», Днепропетровск: «Пороги», 1999. – С. 403–405.
 14. *Новый подход к созданию экспертной системы «Советчик доменщика»* / Е.Л.Суханов, Р.Р.Сыртганов, Л.П.Суханова – Сборник трудов V международного конгресса доменщиков «Производство чугуна на рубеже столетий», Днепропетровск: «Пороги», 1999. – С. 385–387.
 15. *Экспертная система мастера доменной печи* /Е.Б.Иванов, М.Д.Климовицкий, Е.Ф.Анисимов //Металлург, №11, 2010. – С. 38 – 41.
 16. *Тараканов А.К.* Оптимизация базовых режимов работы доменных печей и методов оперативного управления доменной плавкой с использованием математических моделей и ЭВМ. /– Сборник трудов V международного конгресса доменщиков «Производство чугуна на рубеже столетий», Днепропетровск: «Пороги», 1999. – С. 398–400.
 17. *Райх Е.И.* Автоматический контроль и регулирование теплового режима доменной плавки: Труды второй научно-технической конференции молодых исследователей черной металлургии, 15 – 18 октября 1968 г. / – М.: Металлургия, 1971. – С. 96 – 99.
 18. *Доменное производство «Криворожстали».* Монография под ред. чл.–корр. НАНУ В. И. Большакова / В.И.Большаков, А.В.Бородулин, Н.А.Гладков, Н.Г.Иванча, А.В.Кекух, Г.П.Костенко, В.С.Листопадов, Н.М.Можаренко, И.Г.Муравьева, А.С.Нестеров, Г.И.Орел, А.В.Сокурено, Д.Н.Тогобицкая, В.А.Шеремет, С.Т.Шулико, Ф.М.Шутылев – ИЧМ НАНУ, «Криворожсталь». Днепропетровск, Кривой Рог, 2004. – 378 с.
 19. *Система контроля разгара футеровки металлоприемника и формирования продуктов плавки в доменных печах КГГМК «Криворожсталь»: Теория и практика производства чугуна, труды международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь», /Н.М.Можаренко, Д.Н.Тогобицкая, Г.В.Панчоха и др. - 2004. - С. 511–514.*
 20. *Автоматизированная система контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки.* // Д.Н.Тогобицкая, П.И.Отгорвин, А.И.Белькова, А.Ю.Гринько //Металлург. – Москва. -2004. -№4. –С.43-46.
 21. *Стабилизация шлакового режима доменной плавки в условиях работы ДП №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» на многокомпонентной шихте* / В.С.Листопадов, Д.Н.Тогобицкая, И.Г.Муравьева, Н.А.Гладков, А.Ф.Хамхотько, А.И.Белькова – «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2008. – № 8. – С. 14–19.
 22. *Большаков В.И., Муравьева И.Г.* Перспективы управления ходом доменной печи с использованием результатов измерения профиля засыпи /– Металлургическая и горнорудная промышленность, 2004. – №4. – С. 81–84.

23. *Использование информации профилера для выбора управляющих воздействий на ход доменной плавки* / В.И.Большаков, И.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов, С.Т.Шулико, В.С.Листопадов, К.А.Дмитренко, Г.И.Орел – «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2006. – № 5. – С. 29–34.
24. *Реконструкция и освоение систем загрузки доменных печей* / В.И.Большаков, Н.Г.Иванча, И.Г.Муравьева, С.Т.Шулико, Ф.М.Шутылев – Бюл. НТЭИ Черная металлургия. Аглодоменное приложение, 2005. – 56 с.
25. *Особенности представления информации, полученной радиолокационным профилером* / В.И.Большаков, И.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов, С.Т.Шулико, Е.А.Белашапка – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2004. – Вып. 9. – С. 45–50.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук И.Г.Товаровским*

***В.И.Большаков, И.Г.Мурав'їова, Д.Н.Тогобицька, Н.М.Можаренко,
Н.Г.Иванча, Ю.С.Семенов***

Аналіз досвіду створення експертних систем та особливості розроблюваної інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень з керування доменною плавкою

В роботі представлено аналіз відомих інформаційно-моделюючих систем (експертних систем), показано відмінність виконуваних ними функцій, рівня технічного, математичного та інформаційного забезпечення, а також ієрархічної структури. Наведено особливості розроблюваної інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень з управління доменною плавкою. Інтелектуальна система включає ряд математичних моделей, зокрема: дуттєвого і газодинамічного режиму плавки; розподілу компонентів шихтових матеріалів в зонах перетину колошника, опускання шихтових матеріалів в сухій зоні печі, розподілу елементів шихти між продуктами плавки.