



## ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА МАСТЕРА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Е.Б. Иванов (ИПУ РАН)

Рассмотрена экспертная система (советчик) мастера доменной печи, предназначенная для предотвращения аварийных ситуаций, повышения квалификации обслуживающего персонала и обучения студентов старших курсов вузов технических специальностей.

Ключевые слова: экспертная система, советчик, отказоустойчивость, доменная печь.

Доменная печь – непрерывно действующий агрегат шахтного типа, предназначенный для выплавки чугуна и ферросплавов. Протекание ТП в доменной печи основано на противотоке шихтовых материалов и горячих газов. Регулирование сверху производится с помощью изменения интенсивности загрузки шихты, регулирование снизу осуществляется изменением параметров дутья (расход, температура, влажность). Сложность описания данного объекта автоматизации заключается в том, что он является закрытым – наблюдать за происходящими процессами внутри домны не представляется возможным. Накопленные научные знания позволяют соблюдать технологию плавки и являются непременным условием высокопроизводительной и безаварийной работы домны. Однако даже для очень опытного мастера при наличии более трех входных/выходных параметров возникают затруднения по ведению ТП в нормальном режиме. Поэтому целесообразно оснащать доменные печи экспертными системами, помогающими оператору в каждой конкретной ситуации принимать правильное решение.

Экспертная система используется в качестве советчика мастера доменной печи. В случае возникновения аварийных или нештатных ситуаций технолог (оператор) обращается к данной системе "за советом" и практически мгновенно получает ответ по выведению печи на нормальный режим работы. Экспертная система также может использоваться в качестве тренажера для повышения квалификации обслуживающего персонала и обучения студентов старших курсов вузов технических специальностей.

### Принцип разработки экспертной системы

Для описания экспертной системы доменной печи использовался инструментарий теории графов. Вершинами являются модели системы, а направляющими ребрами – параметры, которые связывают их входы/выходы. Рассматривается отказоустойчивая система, когда существует вероятность отказа одной из вершин, но модель продолжает работать в нормальном режиме за счет применения других каналов связи (рис. 1).

На первоначальном этапе используется логическая модель (лм) как основная, применяемая в опера-

тивном управлении с целью предотвращения аварийных ситуаций и сокращения числа простоев. Далее, выходные параметры лм подаются на вход моделей: балансовой (бм), описывающей расчет материального и теплового балансов плавки, и технологической (тм), учитывающей основные расчетные показатели для более полного описания ТП. Следующая физико-химическая модель (фхм) участвует в управлении перераспределением химических элементов между чугуном и шлаком при заданной температуре и, как следствие, получении продукции необходимого состава и качества, контролируемого аналитической моделью (ам). Цель последней – проведение качественного анализа продукции с помощью системы *Rapid* на основе базы данных американского общества стандартов и материалов (*ASTM*) и дальнейшее сравнение результатов с образцами, принятыми в системе за эталон. Также в разработанной экспертной системе доменной печи применяются модели экономики (для расчета себестоимости продукции) и безопасности жизнедеятельности (для определения безопасности работы персонала).

Более подробное описание системы управления доменной печи представлено на рис. 2. В качестве вершин все также выступают разрабатываемые модели, а в фигурных скобках, расположенных напротив соответствующих пунктов, представлены параметры, которые осуществляют взаимосвязь моделей через ребра графа.

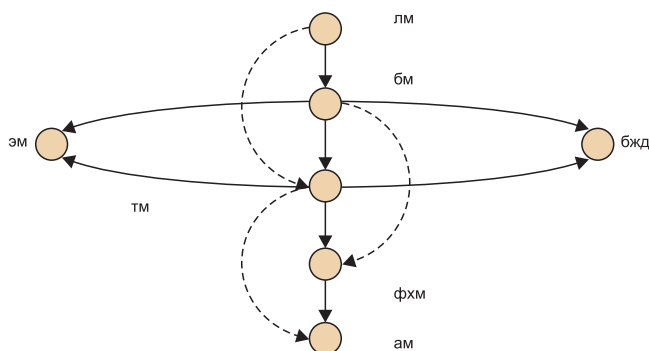


Рис. 1. Граф объединенной модели экспертной системы доменной печи

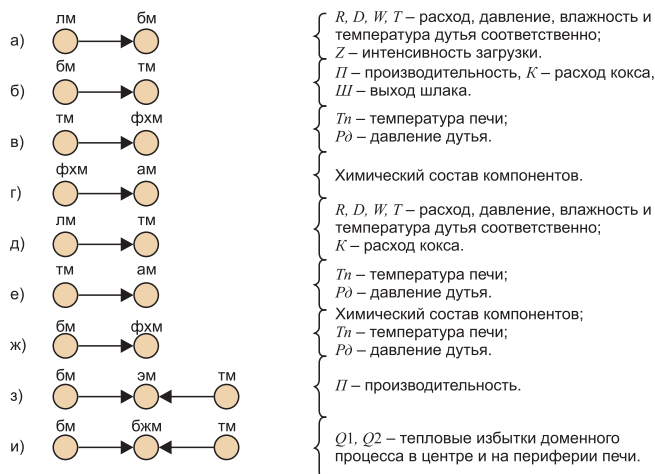


Рис. 2. Представление графа экспертной системы

**Описание моделей экспертной системы**

**Логическая модель** доменного процесса состоит из 17 элементов или логических таблиц, поэтому здесь не используется очередь сообщений. Входами являются значения переменных, характеризующих устройства, с помощью которых оператор управляет ТП. Так как цель регулирования – удержание всех наблюдаемых параметров в "норме", то выходы – значения

наблюдаемых переменных: уровень засыпи ( $H_i$ ), скорость схода шихты ( $V_i$ ), теоретическая температура горения кокса ( $T_i$ ), температура колошниковога газа ( $T_{кг}$ ) и содержание кислорода ( $O_2K$ ) и водорода в колошниковом газе ( $H_2K$ ). Управление домной осуществляется следующими параметрами: расход ( $R$ ), температура ( $T_d$ ) и влажность ( $W$ ) дутья (регулировка снизу); расход топливных добавок и кислорода ( $D$ ); загрузка центра и периферия печи ( $Z$ ) (регулировка сверху). Входы ( $X_i$ ) и выходы ( $Y_j$ ) различных элементов схемы соединены между собой коммуникационными каналами, по которым распространяются значения сигналов.

Тренажер мастера доменной печи построен на базе трехзначной логики [1, 2], когда используются понятия отклонения наблюдаемых параметров от нормы. Пред-

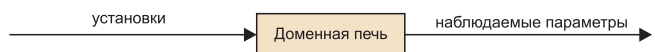


Рис. 3. Ручной режим

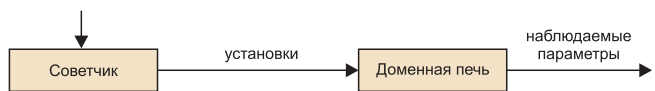


Рис. 4. Ручной режим с советчиком

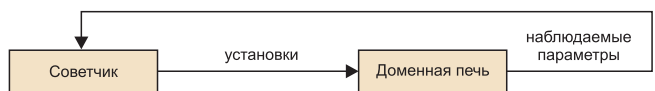


Рис. 5. Автоматический режим

полагается, что нормальные значения наблюдаемых параметров определены интервалом  $X_{ном} \pm \Delta$ , в пределах которого  $X$  принимает значение "норма" (=). В качестве примера рассмотрим модуль преобразователя параметров дутья (табл. 1) и формулы, описывающие их (1-3). Величины характеризуется тремя качественными уровнями: меньше нормы (0), норма (=), больше нормы (1).

$$K_0 = DW \bar{T} \sqrt{D} \tilde{W} T, \tag{1}$$

$$K_x = DWT, \tag{2}$$

$$K_1 = DW \tilde{T}, \tag{3}$$

где  $K_0, K_x, K_1$  – значения выходного параметра качества дутья в режимах меньше нормы, норма и больше нормы;  $\bar{T}, i, \tilde{T}$  – задаваемые параметры в режимах меньше нормы, норма и больше нормы. Для управления доменной печью предусмотрено три режима:

- 1) ручной (рис. 3), когда оператор задает значения управляемых параметров для исполнительных механизмов в терминах: "меньше нормы", "норма", "больше нормы";
- 2) ручной с советчиком (рис. 4), когда советчик в каждом достигнутом состоянии выдает желаемые уставки (так же, как и в ручном режиме оператор задает значения параметров, соглашаясь или изменяя рекомендации советчика);

3) автоматический (рис. 5), когда управление печью осуществляется экспертной системой без вмешательства оператора.

На обработку входных воздействий требуется некоторое время – такт порядка (величина, характеризующая число операций, выполняемых экспертной системой за единицу времени; под выполнением операции подразумевается обработка базы знаний

за один цикл; в нашем случае 1 такт = 1 секунде), а перевод печи в желаемое состояние может потребовать нескольких тактов, на каждом из которых должны использоваться разные воздействия. Использование модели возможно, если из любого ее состояния существует цепь переходов в нормальный режим. Контроль управляемости осуществляется путем последовательного перевода модели во все возможные состояния, для каждого из которых формируются варианты управляющих воздействий.

**Балансовая модель** разработана для соблюдения материального баланса в печи, а именно баланса по марганцу, основности шлака, выходу чугуна из рудной смеси, марганцевой руды и известняка. По составленному балансу определяется необходимое количество железорудной и марганцевой руды, известняка, кокса, природного газа, дутья для сжигания углерода и природного газа, образовавшееся количество колошниковога газа, шлака, водяного пара.

При построении данной модели было установлено, что ее переменные являются одновременно входными для балансовой модели и входными/выходными для логической модели (температура колошниково-

вого газа ( $T_{кр}$ ), влажность ( $W$ ) и температура дутья ( $T_d$ ), расход природного газа ( $D$ )).

Входные переменные модели характеризуют конкретный режим плавки, а также состав сырья, материалов и основного продукта плавки – чугуна. Все входные переменные модели принимают значения из множества положительных чисел:

- состав чугуна, который требуется получить в доменной печи;
- состав агломерата, окатышей, марганцевой руды, флюса, золы кокса, состав природного газа;
- данные условий плавки: температура дутья ( $T_d$ ), чугуна ( $T_q$ ), шлака ( $T_{шл}$ ), колошниковога газа ( $T_{кг}$ ), данные по составу дутья и др.

Выходные переменные модели характеризуют составы побочных продуктов плавки – шлака, колошниковога газа, а также описывают статьи теплового и материального балансов.

Если для производства чугуна используется смесь материалов, то сначала вычисляется содержание каждого из ее компонентов  $K_{см_i}$ , например,  $Fe$ ,  $Si$ ,  $Mn$  или др. в сырьевой смеси по формуле [3]:

$$K_{см_i} = \sum_j \alpha_j K_{mat_{ij}}, \quad (4)$$

где  $K_{mat_{ij}}$  – содержание  $i$ -го компонента смеси в  $j$ -ом сырьевом материале (окатышах, агломерате и др.);  $\alpha_j$  – содержание  $j$ -ого сырьевого материала (окатышей, агломерата и др.) в сырьевой смеси. Затем для определения значений расхода компонентов шихты используют известную систему балансовых уравнений вида [2]:

$$\begin{cases} \mathcal{C}_{PC} \cdot (PC) + \mathcal{C}_{MP} \cdot (MP) + \mathcal{C}_I \cdot (I) = 100, \\ (Mn_{PC}) \cdot (PC) + (Mn_{MP}) \cdot (MP) + (Mn_I) \cdot (I) = 0, \\ (RO)_{PC} \cdot PC + (RO)_{MP} \cdot MP + (RO)_I \cdot I = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где  $PC$  – расход рудной смеси, кг/100 кг чугуна;  $MP$  – расход марганцевой руды, кг/100 кг чугуна;  $I$  – расход известняка, кг/100 кг чугуна;  $\mathcal{C}$  – количество чугуна, образующегося в доменной печи при проплавлении 1 кг данного шихтового материала, кг чугуна/кг материала, определяемые для каждого компонента.

**Технологическая модель доменной печи** представляет собой набор математических формул, позволяющих и помогающих оператору контролировать рабочий ход печи. Такое предоставление дает дополнительное понимание ТП и дополнительные возможности для безаварийной работы. Основными показателями являются производительность печи (6) и расход кокса, а также соответствующие им параметры – длительность выпуска чугуна (7) и число выпусков чугуна в сутки (8) [4].

$$P = (K \cdot H_{p/k} \cdot Fe_{III}) \cdot 0,95 = K / Q_K, \quad (6)$$

где  $P$  – производительность печи, т/сут;  $K$  – количество сожженного кокса, т/сут;  $H_{p/k}$  – нагрузка р/к;  $Fe_{III}$  – количество проплавленного  $Fe$  шихты в сутки; 0,95 – степень использования железа шихты;  $Q_K$  – расход кокса, т/т чугу;

*Печь обучения охотнее всего топится углем экспертных знаний...*

Журнал "Автоматизация в промышленности"

$$\tau_g = P / (60 \cdot \rho_{ч} \cdot V_{ч} \cdot Z \cdot 0,785 \cdot d_{ЛЕТКИ}), \quad (7)$$

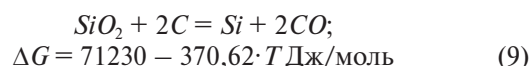
где  $\tau_g$  – продолжительность выпуска чугуна, мин;  $\rho_{ч}$  – плотность чугуна, г/м<sup>3</sup>;  $V_{ч}$  – объем выпускаемого чугуна, м<sup>3</sup>/сут;  $Z$  – число выпусков чугуна в сутки;  $d_{ЛЕТКИ}$  – диаметр чугунной летки, м;

$$Z = (q_n^u + q_n^m) \cdot 1440 / (S_f \cdot h_M \cdot E + ((q_n^u + q_n^m) \cdot \tau_g)), \quad (8)$$

где  $q_n^u$ ,  $q_n^m$  – объемные скорости накопления чугуна и шлака, м<sup>3</sup>/мин; 1440 – число минут в сутках;  $h_M$  и  $S_f$  – высота и площадь поперечного сечения металлоприемника, м, м<sup>2</sup>;  $E$  – коэффициент заполнения горна чугуном и шлаком, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

**Физико-химическая модель.** При разработке данной модели возникла задача перераспределения химических элементов между чугуном и шлаком при заданной температуре и давлении дутья в печи, что позволяет оценить химический состав и физические свойства получаемого материала. Решением является использование вышеуказанных параметров (на входе) из расчета технологической модели и получение энергии Гиббса максимально приближенной к равновесию ( $\Delta G \rightarrow 0$ ). Таким образом, можно установить оптимальную рабочую температуру в печи для получения продукции необходимого химического состава и качества.

Развитие и завершенность восстановительных процессов оценивается термодинамическими расчетами с использованием современных теорий и моделей металлического и оксидного растворов [5]. В качестве примера представим распределение кремния между чугуном и шлаком по реакции взаимодействия кремнезема в шлаке и углерода в чугуне:



с использованием уравнения изотермы реакции:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \cdot \ln D = -RT \cdot \ln(K_p/D), \quad (10)$$

где  $K_p = \exp(\Delta G^0/(RT))$  – константа равновесия реакции;  $\Delta G^0$  – стандартная энергия Гиббса реакции;  $\Delta G$  – энергия Гиббса реакции;  $D = (P_{CO(KOH)}^2 \cdot a_{Si(KOH)} / (a_{SiO_2(KOH)} \cdot a_{C(KOH)}))$  – функция конечного состояния чугуна и шлака (степень готовности продукции);  $PCO$  – парциальное давление  $CO$  в газовой фазе;  $a_{i(KOH)}$  – активности кремния и углерода в чугуне и кремнезема в шлаке.

**Модель аналитического контроля.** Аналитический контроль позволяет оценивать содержание определяемых компонентов в контролируемом веществе. Результаты аналитического контроля являются основанием для вынесения решения о соответствии или несоответствии химического состава этих веществ регламентируемым требованиям [6]. Возможность повышения качества металлопродукции, обеспечение полного и комплексного использования сырья, безо-

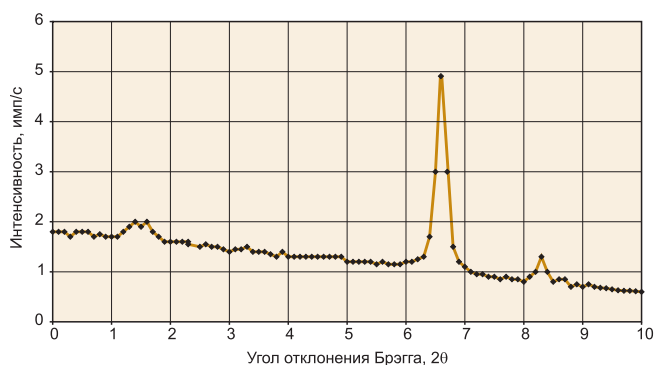


Рис. 6. Рентгенофазовый анализ чугуна доменной печи

пасность производства и охрана окружающей среды в значительной степени определяется состоянием средства аналитического контроля, их действенностью и надежностью.

Для определения масс и концентраций анализируемого чугуна и шлака (количественный анализ), а также обнаружения их компонентов – атомов, ионов, молекул (качественный анализ, рис. 6) используется модель аналитического контроля.

В соответствии с химическим анализом образец состоит из карбида Fe с примесью Cr:  $(FeCr)_3C$ . Фаза: Феррит + Цементит. В соответствии с системой ASTM существует некоторое смещение, так как присутствует влияние Cr на содержание Fe.

**Модель безопасности жизнедеятельности персонала.** В соответствии с Правилами безопасности ПБ 11-493-02, утвержденными Госгортехнадзором РФ [7], доменная печь относится к высокоопасным объектам. Следовательно, для безопасности персонала, обслуживающего доменную печь, в цехе применяют теплоотводящий экран, который представляет собой сварную плиту из стальных листов, с внутренней стороны футерованную огнеупорным кирпичом. Между сварными листами циркулирует вода, которая поглощает тепло и уносит его. Необходимое количество воды для охлаждения экрана, кг/т, определяется по формуле [8]

$$G = (a \cdot E_H \cdot F) / (c \cdot (t_{yx} - t_n)), \quad (11)$$

где  $a$  – коэффициент поглощения инфракрасных лучей материалом экрана и водой;  $E_H$  – интегральная плотность теплового потока от источника излучения, Вт;  $F$  – площадь стенки экрана, м<sup>2</sup>;  $c$  – теплоемкость воды, Вт/(кг·К);  $t_{yx}$  – температура уходящей воды, °С;  $t_n$  – температура поступающей воды, °С.

Травматизм характеризуется коэффициентами частоты  $KЧ$  и тяжести травматизма  $КТ$ :

$$KЧ = 1000 \cdot N / Ч, \quad (12)$$

$$КТ = D / N, \quad (13)$$

где  $N$  – число несчастных случаев за выбранный промежуток времени;  $Ч$  – среднесписочное число работающих за этот же промежуток времени;  $D$  – суммарное число дней нетрудоспособности.

Одним из показателей надежности является вероятность безотказной работы агрегата:

$$P = (N' - n') / N', \quad (14)$$

где  $N'$  – число включений;  $n'$  – число отказов.

Вероятность отказа равна  $q = 1 - P$ . Надежность последовательно совершаемых действий ( $A$  – первичное действие,  $B$  – вторичное действие) равна  $P(AB) = P(A) \cdot P(B)$ .

Вероятность отказа:

$$q(A + B) = 1 - P(A) \cdot P(B) = q(A) + q(B) - q(A) \cdot q(B).$$

Надежность элемента при его резервировании:

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B). \quad (15)$$

В настоящее время данная модель совершенствуется введением дополнительных параметров безопасности.

**Экономическая модель.** Применение в экспертной системе модели расчета экономики производства позволяет определить себестоимость выплавки чугуна на следующем образом.

Затраты по каждой  $i$ -статье рассчитываются по формуле [9]:

$$Z_i = K_i \cdot \Pi_i, \quad (16)$$

где  $K_i$  – расходный коэффициент, показывающий сколько требуется заданного компонента для получения 1 кг чугуна;  $\Pi_i$  – цена на этот компонент.

Общее количество материалов, задействованных в производстве, определяется как:

$$Z_{в.произв} = Z_{топливо} + Z_{осн.матер}, \quad (17)$$

где  $Z_{топливо}$  – затраты на топливо (кокс и природный газ);  $Z_{осн.матер}$  – затраты на основные материалы (руда, агломерат, окатыши).

Расходы по переделу:

$$Z_{передел} = Z_{пер.топливо} + Z_{энерг.} + Z_{др.по.переделу}, \quad (18)$$

где  $Z_{пер.топливо}$  – затраты по переработке и обогащению топлива;  $Z_{энерг.}$  – энергетические затраты на передел;  $Z_{др.по.переделу}$  – другие дополнительные затраты.

Побочная продукция:

$$Z_{побочн.продукция} = \Pi_{шлак} \cdot M^{шлак} \cdot np_1 + \Pi_{кол.газ} \cdot M^{к.з.} \cdot np_2, \quad (19)$$

где  $M^{к.з.}$ ,  $M^{шлак}$  – масса колошникового газа и шлака, вычисляемые по методике расчета балансовой модели процесса производства чугуна Рамма-Похвиснева, кг;  $\Pi_{шлак}$ ,  $\Pi_{кол.газ}$  – рыночная цена на шлак и колошниковый газ, руб;  $np_1$  – доля шлака, которая идет на продажу;  $np_2$  – доля колошникового газа, которая идет на сторону.

Таким образом, общая себестоимость рассчитывается как:

$$C = Z_{в.произв-отходы} + Z_{передел} - Z_{побочн.продукция} \quad (20)$$

Если получится, что расчеты себестоимости по формуле (20) меньше рыночной цены, то производство эффективно. В противном случае необходимо пересмотреть затраты по каждой  $i$ -статье и целесообразность дальнейшей работы на существующих условиях.

**Результаты применения экспертной системы мастера доменной печи**

Экспертная система мастера доменной печи разработана специалистами ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. Система реализована средствами языка программирования Delphi. На рис. 7 представлен ее интерфейс, который состоит из графического (профиль доменной печи, слева) и динамического (режим управления, наблюдаемые и регулируемые параметры в виде трехзначной логики с их соответствующими значениями, справа) протоколов.

В качестве примера рассмотрен аварийный вариант работы печи на повышенном расходе дутья ("выше нормы") и низкой температуре дутья ("ниже нормы"). В результате получены отклонения наблюдаемых параметров на периферии печи: температура горения ( $T_1$ ) и скорость схода шихты ( $V_1$ ) "ниже нормы", высота столба шихты ( $H_1$ ) "выше нормы". При включении режима "автомат" печь выходит на нормальный уровень за два такта по времени за счет уменьшения интенсивности загрузки печи на периферии ( $Z_1$ ). Такая оперативность позволяет оператору (технологу) достаточно быстро принимать правильные решения.

В дальнейшем был проработан вопрос по затрачиваемому времени на выведение доменной печи из возможного аварийного состояния. В результате рассчитано общее время обработки информации  $T_{общ}$  с помощью советчика мастера:

$$T_{общ} = T_1 + T_2 + T_3, \quad (21)$$

где  $T_1$  – время на обработку информации, полученной с доменной печи, мин;  $T_2$  – время принятия решения, мин;  $T_3$  – время на исправление режима работы печи мастером и консультации экспертов, мин.

В таблице 2 представлены данные по затратам времени на обработку аварийной ситуации и изменению режимов управления. Таким образом, советчик в среднем в 2...4 раза быстрее помогает мастеру обработать полученную информацию и провести кардинальные изменения в работе доменной печи.

Впервые экспертная система мастера доменной печи была внедрена в качестве тренажера в учебный процесс Московского института стали и сплавов (Новотроицкий филиал) в 2007 г. На сегодняшний день экспертная система имеет свидетельство о регистрации компьютерных программ для ЭВМ (№2007613391) и рекомендована для внедрения на производстве.

**Заключение**

В разработанной экспертной системе мастера доменной печи использован принцип гетерогенного моделирования. Это позволяет сократить число ошибок при разработке, проектировании и эксплуатации системы и, как следствие, дать достаточно полное и четкое управление ТП.

*Евгений Борисович Иванов – аспирант Института проблем управления им. В.А. Трапезникова.  
Контактный телефон (495)334-93-70. E-mail: ivanov-ics@mail.ru*

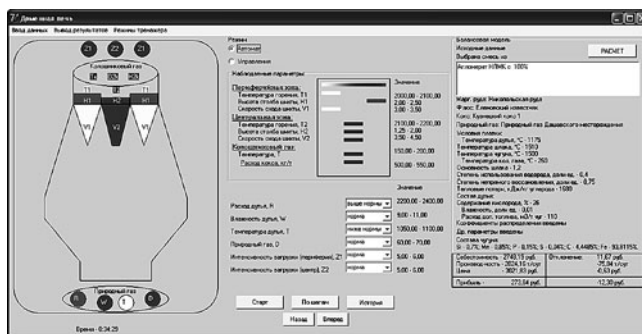


Рис. 7. Интерфейс экспертной системы мастера доменной печи

Таблица 2

Время, мин	Работа мастера без советчика	Работа мастера с советчиком
$T_1$	1..2	1...2
$T_2$	10...30	5...10
$T_3$	3...5	3...5
$T_{общ}$	14...37	9...17

Представленная структура системы была адаптирована к функционированию на других высокотемпературных объектах за счет изменения входных/выходных параметров моделей и связей между ними. Так разработаны в качестве советчиков экспертные системы шахтной, туннельной и обжиговой печей, а также шлакоперерабатывающей установки (свидетельства об официальной регистрации компьютерных программ для ЭВМ №№ 2007613839, 2007612365, 2007613838, 2007611236).

**Список литературы**

1. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир. 1976 г.
2. *Кудинов Ю.И., Дорохов И.Н., Пащенко Ф.Ф.* Нечеткие регуляторы и системы управления // Проблемы управления. 2004. №3.
3. *Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н. и др.* Металлургия чугуна. М.: Академкнига, 2004.
4. *Волков Ю.П., Шнарбер Л.Я., Гусаров А.К.* Технолог – доменщик. – М., Металлургия, 1986.
5. *Падерин С.Н., Филиппов В.В.* Теория и расчеты металлургических систем. М.: МИСИС 2002.
6. *Карпов Ю.А., Гиммельфарб Ф.А., Савостин А.П., Сальников В.Д.* Аналитический контроль металлургического производства. М.: Металлургия, 1995.
7. Общие правила промышленной безопасности для металлургических и коксохимических предприятий и производств (ПБ 11-493-02). Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 21.06.2002 г. № 35, зарегистрированы в Минюсте России 11.09.02 г. № 3786
8. *Бринза В.Н.* Охрана труда и окружающей среды, уч. пособие для практических занятий для всех специальностей. М.: МИСиС. 1985.
9. *Белобородова В. А., Чечета А. П., Слабинский В. Т. и др.* Калькуляция себестоимости продукции в промышленности. М.: Финансы и статистика. 1989.