

На правах рукописи

*Сучков*

**Сучков Андрей Владимирович**

**АНАЛИЗ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ  
МНОГОМЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ НА  
ПРИМЕРЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации (в промышленности)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Лисиенко Владимир Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Кориков Анатолий Михайлович

кандидат технических наук, доцент  
Коновалов Виктор Иванович

Ведущая организация: ФГУП НПО автоматики имени  
академика Н.А. Семихатова, г.  
Екатеринбург

Защита состоится 22 декабря 2010 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.06 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84/3.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.06, кандидат технических наук, доцент



М.А. Сонькин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Многомерные технологические объекты являются основой таких отраслей экономики как металлургия, энергетика, атомная, химическая промышленность и ряд других. Они характеризуются наличием большого количества (десятков и сотен) входных и выходных параметров и переменных, многие из которых взаимосвязаны.

Необходимо отметить, что в рассматриваемых объектах ошибки при управлении могут привести к авариям, последствиями которых могут быть не только значительные экономические потери, но и человеческие жертвы. С другой стороны, эффективные решения позволяют добиться значительной экономии ресурсов либо улучшения результатов процесса.

Современный уровень знаний о технологических процессах позволяет осуществить их описание с помощью математических моделей. Однако соответствующие зависимости выходных величин от входных являются достаточно сложными и не всегда позволяют решить обратную задачу, то есть получить значения управляющих переменных при задании требуемых результатов процесса. Окончательное решение по управлению остается за человеком, при этом эффективным средством является использование системы поддержки принятия решений (СППР), функционирующей в режиме советчика.

В диссертационной работе решение ряда проблем управления многомерными технологическими объектами рассмотрено на примере доменного производства.

Доменная плавка является сегодня и останется в обозримом будущем наиболее сложным и определяющим технологическим процессом в черной металлургии. Доменное производство является самым энергоёмким, на его долю приходится около 50% энергии, используемой чёрной металлургией, при этом основная доля энергетических затрат приходится на дорогостоящий и дефицитный кокс. В настоящее время многие металлургические предприятия России рассматривают возможность внедрения технологии подачи пылеугольного топлива (ПУТ) в доменную печь для снижения расхода кокса.

Часть функций по сбору данных и осуществлению регулирующих воздействий выполняет автоматика, однако сфера ее применения ограничена, потому основная ответственность в принятии решений лежит на персонале доменной печи.

В связи с вышесказанным разработка методов повышения эффективности управления доменным процессом, включающих решение задач, связанных с разработкой методов и средств выбора решений на основе моделирования и использования компьютерной техники, а также оценкой компетентности персонала является актуальной задачей.

**Цель работы** состоит в совершенствовании управления доменной печью как многомерным технологическим объектом. Это достигается решением следующих задач:

- обоснованным выбором и использованием модели технологического процесса, позволяющей решать проблемы оперативного управления доменной плавкой;
- разработкой системы поддержки принятия решений для мастера доменной печи, формирующей наборы значений управляющих величин на основе модели процесса при заданных компонентах векторного критерия эффективности и ограничениях на выходные и внутренние переменные этого процесса;
- исследованием эффективности использования пылеугольного топлива, в том числе увлажненного, в качестве комплексной управляющей переменной величины;
- разработкой методики построения тестов для оценки компетентности персонала доменной печи, ее практической реализацией при формировании набора тестовых заданий;
- разработкой соответствующего программного обеспечения, реализующего систему поддержки принятия решений и методику построения тестовой системы;
- исследованием результатов применения разработанных методов для решения практических задач управления доменной печью.

**Методы исследования.** В ходе решения задач исследования использовались: методы системного анализа, теории принятия решений, классификации, экспертных оценок, теория теплообмена в доменной печи, объектно-ориентированное программирование, а также моделирование производственных ситуаций.

**Научную новизну** диссертации представляют следующие результаты:

- методика формирования множества параметров и переменных величин многомерного объекта, используемых для описания объекта и построения его модели, основанная на теории системного анализа, позволяющая, в отличие от общепринятого подхода (на основе профессионального опыта), структурировать это множество и обосновать его компоненты;
- алгоритмы расчета индексов теплового состояния доменной печи на основе параметров и переменных, используемых в модели процесса (созданной в Институте металлургии УрО РАН), и применение значений этих индексов в качестве внутренних переменных при управлении, позволяющее повысить стабильность работы печи;
- использование векторного критерия оптимальности при выборе значений управляющих переменных доменного процесса, позволяющего осуществлять учет одновременно нескольких требований к результатам этого процесса и тем самым повысить его эффективность;
- эвристический алгоритм классификации наборов значений управляющих воздействий на заданное число классов, а также формирования рекомендуемых их сочетаний для целей управления доменным процессом, позволяющий эффективно решить проблему определения

рационального набора значений управляющих воздействий и сократить время выбора решений при управлении;

- методика формирования тестовой системы для оценки компетентности технических специалистов на основе теории системного анализа и экспертных оценок, позволяющая разработать комплексную структуру теста и полный набор тестовых заданий, использование которых обеспечивает повышение качества оценки уровня компетентности персонала.

#### **Практическая ценность исследований.**

В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие практические результаты:

- осуществлена реализация методики формирования множества параметров и переменных многомерных объектов применительно к доменной печи, полученные компоненты использованы для выбора модели доменного процесса, выявлена необходимость и осуществлена модернизация этой модели, позволившая более полно оценивать состояние процесса и обоснованно выбирать управляющие воздействия;
- разработан программный продукт, реализующий функции системы поддержки принятия решений, который включает в себя модель процесса и процедуру поиска решений на ее основе с использованием предложенных в работе алгоритмов, дающий возможность выбора более качественных решений и в более короткие сроки, чем применяемые на многих предприятиях методы;
- разработана программа «Experts Inquiry», реализующая методику формирования тестовой системы, предназначенная для упрощения и повышения эффективности работы экспертов, с использованием которой создан комплекс тестовых заданий для оценки уровня компетентности работников доменного производства, позволяющий повысить качество такой оценки;
- проведен анализ эффективности использования увлажненного пылеугольного топлива, пока не применяемого в доменном производстве России. Получены зависимости влияния влажности угольной пыли на расход кокса и другие переменные доменного процесса, проведена оценка экономической эффективности использования ПУТ в качестве топлива в доменных печах России.

Основные результаты диссертационной работы внедрены и используются на Чусовском металлургическом заводе, Нижнетагильском металлургическом комбинате и Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Работа является составной частью программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса», финансируемой Российским Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- предложенная методика формирования множества параметров и переменных многомерного объекта, основанная на теории системного анализа, позволяет получить структуру этого множества и обосновать его элементы;
- разработанные алгоритмы расчета индексов теплового состояния доменной печи позволяют рассчитывать их значения на основе параметров и переменных, используемых в модели процесса, а их применение в системе поддержки принятия решений позволяет повысить стабильность работы печи;
- использование предложенного векторного критерия оптимальности при выборе значений управляющих воздействий доменного процесса позволяет учитывать одновременно несколько требований к результатам процесса и повышает общую эффективность работы печи;
- разработанный эвристический алгоритм классификации наборов значений управляющих воздействий на заданное число классов, а также формирования рекомендуемых их сочетаний позволяет в течение допустимого времени решать задачу выбора рекомендуемых значений управляющих величин в заданных условиях;
- предложенная методика формирования тестовой системы для всесторонней оценки компетентности технических специалистов на основе теории системного анализа и экспертных оценок позволяет сформировать обоснованную и рациональную структуру теста и набор тестовых заданий.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции «Топливо-металлургический комплекс» (Екатеринбург, 2007), международной научной конференции «Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании» (Екатеринбург, 2008), международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2008» (Екатеринбург, 2008), XV международной научной конференции молодых ученых (Екатеринбург, 2008), международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Б.И. Китаева (Екатеринбург, 2009), VI межотраслевой научно-технической конференции «Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли» (Новоуральск, 2009), научных семинарах кафедры автоматики и управления в технических системах УрФУ.

**Публикации.** По результатам диссертационных исследований опубликовано 16 печатных работ, из них 4 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 128 наименований, 6 приложений и содержит 147 стр. основного машинописного текста, 37 рисунков, 10 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность работы, формулируется цель, задачи, методы исследования, положения, характеризующие научную новизну и практическую значимость результатов. Приводятся сведения об объеме и структуре диссертации.

**В первой главе** рассмотрены и проанализированы общие характеристики доменной печи как объекта управления. Приведены сведения о средствах автоматизации доменной печи; показана неспособность на данный момент средствами автоматики полностью заменить человека при решении задач управления. Рассмотрены используемые средства поддержки принятия решений, их недостатки. Сделан вывод об актуальности разработки такой системы, обладающей рядом особенностей.

Выделены существующие подходы к построению моделей доменного процесса, включая модели, построенные на основе принципа «черного ящика», и на базе аналитического подхода. Рассмотрены известные модели, в том числе разработанные в МИСиС, УГТУ-УПИ, Институте металлургии УрО РАН, ВНИИМТ, австралийской компании «Broken Hill Proprietary» и японской «Nippon Steel». Проведено сравнение общих характеристик рассмотренных моделей.

Рассмотрены проблемы, касающиеся персонала металлургических предприятий. Отмечено, что квалификация персонала играет решающую роль в управлении доменной печью. Рассмотрены методы оценки компетентности работников, сделан вывод о предпочтительности использования тестов для решения данной задачи.

В заключительной части первой главы сделаны выводы о проблемах доменного производства, поставлены задачи исследования.

**Во второй главе** предложена методика формирования множества параметров и переменных многомерного объекта для его описания, построения модели объекта или обоснования ее выбора из числа существующих. В основе методики лежат положения системного анализа, рассмотренные в работах Ф.И. Перегудова и Ф.П. Тарасенко.

Для определения набора конкретных параметров и переменных производится последовательная декомпозиция (разбиение) глобальной цели на отдельные компоненты до тех пор, пока не получают вполне понятные и реализуемые фрагменты. Иерархия целей и функций образована следующими уровнями:

- глобальная цель системы формулируется как «Формирование множества параметров и переменных объекта, необходимого для его описания и управления»;
- на втором уровне глобальная цель разбивается на подцели в соответствии с моделью конечных продуктов объекта;
- третий уровень дерева предусматривает разбиение подцелей на компоненты в соответствии с набором технологических процессов, реализуемых при получении конечных продуктов;

- на четвертом уровне осуществляется декомпозиция компонентов третьего уровня с учетом этапов каждого технологического процесса;
- пятый уровень дерева предусматривает необходимость управления каждым процессом на каждом его этапе и включает в себя соответствующие этапы цикла управления;
- на шестом уровне формируется множество параметров и переменных, соответствующих каждой ветви дерева.

В соответствии с предложенной декомпозицией сформирован набор около 100 групп величин применительно к получению основных продуктов доменного производства (чугуна, шлака, колошникового газа и пыли), включающий более 300 показателей. В результате использования полученного набора, а также с учетом временных характеристик проанализированных моделей и данных о результатах их применения для описания и изучения доменных процессов в работе выбрана балансовая модель, разработанная в Институте металлургии УрО РАН, в которой используется 101 входная переменная и 48 выходных. Рассмотрены положения и соотношения, лежащие в основе данной модели, приведена упрощенная схема расчетов, параметры, используемые для настройки, примеры ее практического использования. Показано, что значительная часть вычислений в модели производится на основе эмпирических данных.

В результате сравнительного анализа сформированного с использованием методики и имеющегося в модели набора параметров и переменных выявлена необходимость внесения в данную модель вычисления таких показателей, как индексы теплового состояния доменной печи. Эти величины, в соответствии с положениями теории теплообмена, разработанной Б.И. Китаевым, могут использоваться для анализа текущей ситуации в доменном процессе и управления тепловым состоянием печи. Разработаны алгоритмы расчета данных показателей, в которых используются величины, применяющиеся в модели (как в качестве входных, так и в качестве расчетных), что позволило совместить вычисление индексов теплового состояния верха и низа печи с нахождением показателей плавки и включить соответствующий блок в состав балансовой модели.

В данной главе также приводятся результаты исследования применения увлажненного пылеугольного топлива в доменной печи, полученные путем моделирования, что особенно актуально для металлургической промышленности России. Способ подачи увлажненного пылеугольного топлива предложен В.Г. Лисиенко в 2005 г. С использованием параметров и условий работы восьми доменных печей российских предприятий объемом от 205 до 2700 м<sup>3</sup> исследованы зависимости расхода кокса, температуры фурменного очага и температуры колошникового газа от количества подаваемой угольной пыли и содержания в ней влаги.

В работе показаны преимущества применения увлажненного ПУТ по сравнению с используемой сейчас сухой угольной пылью и требуемом при этом увлажнении дутья. Рассчитан ряд коэффициентов, характеризующих зависимость расхода кокса и температур от количества угольной пыли и ее

влажности, дана экономическая оценка использования увлажненного ПУТ, сформирован ряд рекомендаций по его применению. Значительная часть полученных результатов вынесена в приложение.

**Третья глава** диссертации посвящена разработке методики построения системы поддержки принятия решений (СППР) и ее практической реализации.

Задача состоит в определении таких значений управляющих переменных доменного процесса, которые обеспечивают достижение допустимых значений выходных и внутренних переменных и оптимизируют векторный критерий эффективности.

В качестве такого критерия в работе используется выражение вида

$$F = K^h * V_k + P^h * V_n + S^h * V_{sh}, \quad (1)$$

где  $K^h$ ,  $P^h$ ,  $S^h$  – нормализованные безразмерные значения расхода кокса, производительности печи и выхода шлака соответственно;  $V_k$ ,  $V_n$ ,  $V_{sh}$  – веса, отражающие предпочтительность данных критериев в конкретной ситуации, причем  $0 \leq V_i \leq 1$ ,  $\sum_{i=1}^3 V_i = 1$ .

Величина  $P^h$  определяется по выражению:

$$P^h = \frac{P_i - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}}, \quad (2)$$

а для минимизируемых параметров  $K^h$  и  $S^h$ , обозначенных далее как  $X$ , при определении нормированных значений используется выражение вида:

$$X^h = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}}. \quad (3)$$

В выражениях (2), (3) максимальное и минимальные значения параметров определяются технологическими возможностями оборудования и условиями работы печи, а  $P_i$ ,  $X_i$  – текущие значения параметра.

Критерий  $F$  находится в интервале  $[0 ; 1]$ , причем единица получается в случае идеального значения каждого параметра.

В работе приведены результаты экспериментов по использованию векторного критерия вида (1). При одной и той же исходной информации в зависимости от веса критерия удельный расход кокса изменяется в пределах 1,1%, производительность 0,7%, выход шлака в пределах 1,1% (что соответствует количеству до десятков тонн в сутки данных материалов для одной печи). Таким образом, применение векторного критерия позволяет выбирать наилучшие решения в процессе управления доменной печью с учетом требований производства.

Задача поиска рациональных значений входных воздействий имеет смысл, если имеется возможность варьирования значений каких-либо управляющих величин. К числу таких переменных отнесены содержание кислорода в дутье, температура и влажность дутья, количество подаваемого природного газа и угольной пыли, заданная основность шлака, содержание в шихте железа. Допустимые интервалы значений переменных, либо их точечные оценки могут меняться оператором исходя из информации о ходе

процесса. Для внутренних и выходных переменных также задаются предпочтительные значения и допустимые отклонения. В качестве этих величин приняты температура фурменного очага, содержание кремния в чугуне, индексы теплового состояния нижней и верхней зоны печи. Они представляют собой ограничения оптимизационной задачи.

Для решения поставленной задачи используется модернизированная балансовая модель, рассмотренная во второй главе. Общий алгоритм формирования значений управляющих величин в СППР приведен на рис. 1.

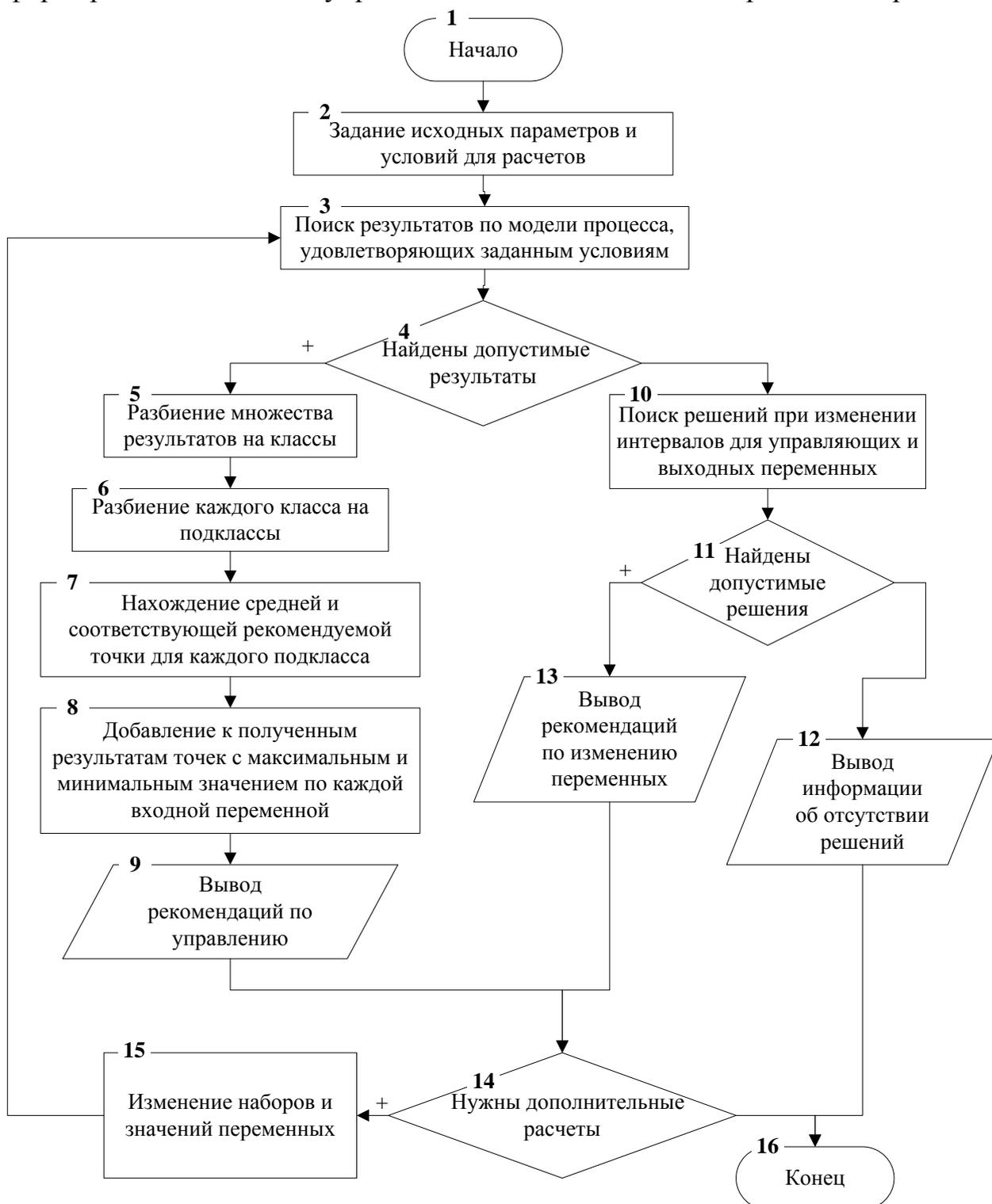


Рис. 1. Алгоритм формирования рекомендаций в СППР

В результате работы алгоритма необходимо найти рекомендуемые значения входных переменных доменного процесса, а используемая модель рассчитывает, наоборот, выходные величины при уже известных входных. Для решения подобных задач существуют, например, статистические методы поиска оптимальных решений. Однако имеется ряд препятствий для их использования:

- функциональные зависимости между наборами входных и выходных переменных, как правило, отсутствуют (из-за широкого применения эмпирических данных);
- ввиду приближенности используемой модели возникает необходимость поиска не одного, а множества субоптимальных решений, количество которых в общем случае может быть достаточно велико и все они должны быть найдены.

Исходя из этого поиск результатов предлагается осуществлять путем перебора с заданным шагом возможных значений входных величин из их интервалов с учетом допустимых значений выходных и внутренних переменных печи. Если такие варианты результатов найдены (получены возможные решения), то из них выбираются те, которые оптимизируют, с заданной погрешностью, обусловленной приближенностью модели, критерий эффективности. Таким образом находятся субоптимальные решения.

В общем случае количество субоптимальных решений может быть велико (доходить до нескольких тысяч), поэтому осуществляется выделение из их числа ключевых решений, которые являются рекомендуемыми. Этот процесс реализуется блоками 5-8 алгоритма (рис. 1), остановимся на нем более подробно.

Рассмотрим многомерное пространство, координатами которого являются управляющие воздействия. Каждой точке в этом пространстве соответствует набор управляющих воздействий.

*Шаг 1.* Разбиение всего множества субоптимальных решений на классы.

Рассмотрим задачу разбиения полученного множества субоптимальных решений  $A$ , мощность которого равна  $n$ , на заданное число классов  $p$ . В качестве меры близости между точками  $i$  и  $j$  пространства субоптимальных решений предлагается ввести величину

$$C_{ij} = \sum_{l=1}^m |b_{li} - b_{lj}|, \quad (4)$$

где  $b_{li}, b_{lj}$  – число шагов по координате  $l$  от ее начала, полученное при формировании соответствующей точки;  $m$  – число управляемых в данной ситуации переменных (координат пространства).

Введем в рассмотрение величины  $X_{ik}, X_{jk}$ , которые равны 1, если соответствующая точка  $i$  принадлежит  $k$ -му классу, и 0 – в противном случае. Тогда математическая постановка задачи имеет следующий вид.

Найти минимум целевой функции  $Z$ :

$$Z = \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ik} C_{ij} X_{jk}, \quad (5)$$

при ограничениях

$$\sum_{k=1}^n X_{ik} = 1, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ik} \geq 1, \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n X_{ik} = n, \quad (8)$$

Ограничение (6) характеризует тот факт, что каждый объект принадлежит только одному классу, ограничение (7) свидетельствует о том, что каждый класс состоит хотя бы из одного объекта, а ограничение (8) требует, чтобы все множество субоптимальных решений было распределено по классам.

При формировании классов используется эвристический подход, при этом принято, что если выполняется условие (9) для всех измерений (координат)  $l$ :

$$|b_{li} - b_{lj}| \leq 1, \quad (9)$$

то точки  $i$  и  $j$  принадлежат одному классу.

Процесс разбиения на классы осуществляется следующим образом. Вначале из множества  $A$  выбирается произвольная точка и относится к классу  $A_1$ , затем проверяют все остальные на выполнение условия (9) и точки, для которых оно выполняется, помечаются принадлежащими этому же классу. Для каждой из новых точек класса проводится процедура проверки принадлежности к классу  $A_1$  непомеченных ранее точек и при выполнении условия выбранные точки также включаются в класс  $A_1$ . Проверка продолжается далее и на каком-то шаге не будет найдено новых точек, принадлежащих данному классу. Таким образом класс  $A_1$  сформирован. Аналогичным образом из числа оставшихся (не входящих в  $A_1$ ) точек формируют класс  $A_2$  и последующие.

*Шаг 2.* Разбиение каждого полученного на предыдущем шаге класса на подклассы.

Полученные классы делятся на подклассы исходя из величины некоторого заданного интервала точности, до тех пор, пока размер каждого из полученных подклассов по каждому измерению не станет равным или меньшим соответствующего интервала точности. Этот интервал определяется в соответствии с условием: изменение входной переменной на величину, равную интервалу точности, оказывает заметное влияние на процесс (например, происходит отклонение значений выходных величин процесса более чем на 1%).

Для разбиения класса  $k$  оценивается его протяженность в шагах по каждой управляющей переменной. По измерению с наибольшей протяженностью  $L_k^{max}$  класс  $k$  делится на равные части. Их количество  $S$  находится по выражению (10):

$$S = \text{Int}(L_k^{max}/t_l) + 1, \quad (10)$$

где  $\text{Int}$  - целая часть дробного числа (операция округления дробного числа в меньшую сторону);  $t_l$  – интервал точности по координате  $l$ , для которой достигается  $L_k^{\max}$ .

Каждый из полученных подклассов аналогичным образом оценивается по другим управляющим переменным и разбивается по измерению с наибольшей протяженностью. Таким образом подклассы делятся до тех пор, пока размер каждого из них не станет равным или меньшим соответствующего интервала точности по каждому измерению.

Пример разбиения класса на подклассы приведен на рис. 2. Здесь интервал точности равен 3 шагам для обоих измерений, поэтому класс делится по оси первого управляющего воздействия (горизонтали) на 4 интервала равной протяженности. Далее каждый полученный интервал делится по второму измерению (вертикали) на равные части, не превышающие интервала точности. Точки, лежащие на линии разделения, причисляются к области с меньшими значениями соответствующей управляющей величины.

*Шаг 3.* Нахождение результирующей точки для каждого подкласса.

Для каждого подкласса находится средняя точка. Значения ее координат  $b_{lc}^q$  определяются по выражению (11):

$$b_{lc}^q = \frac{\sum_{i=1}^{n_q} b_{li}}{n_q}, \quad (11)$$

где  $b_{li}$  – значение координаты  $l$  для точки  $i$ , относящейся к подклассу  $q$ ;  $n_q$  – число элементов в  $q$ -м подклассе.

В качестве результирующей выбирается точка  $r$ , уже входящая в число решений, ближайшая к расчетной средней. Для этой точки характерно минимальное значение расстояния  $U_r$  от каждой точки  $q$ -го подкласса, определяемое выражением (12):

$$U_r = \min_{r \in A_q} \sum_{l=1}^m |b_{lr} - b_{lc}|, \quad (12)$$

где  $b_{lc}$  – значение координаты  $l$  (в шагах) для средней точки  $c$  подкласса  $q$ ;  $A_q$  – множество точек, составляющих подкласс  $q$ ,  $m$  – число параметров.

На рис. 2 точки, ближайшие к средней точке соответствующего подкласса, показаны в виде черных точек. В данном примере выбрано две управляющих переменных и число точек невелико, на практике число измерений может быть до 5 (из технологических соображений), исходное число точек – до нескольких тысяч, количество результирующих – до 15-20.

*Шаг 4.* Добавление к результирующим точкам, полученным на предыдущем шаге, крайних точек множества субоптимальных решений по каждому измерению.

Часто в процессе управления предпочтительными являются крайние значения управляющих величин, обеспечивающие нужные результаты, поэтому итоговый массив дополняется точками, имеющими минимальное и максимальное значение каждой переменной на найденном множестве

субоптимальных решений. В рассматриваемом примере крайних точек четыре, на рис. 2 они перечеркнуты.

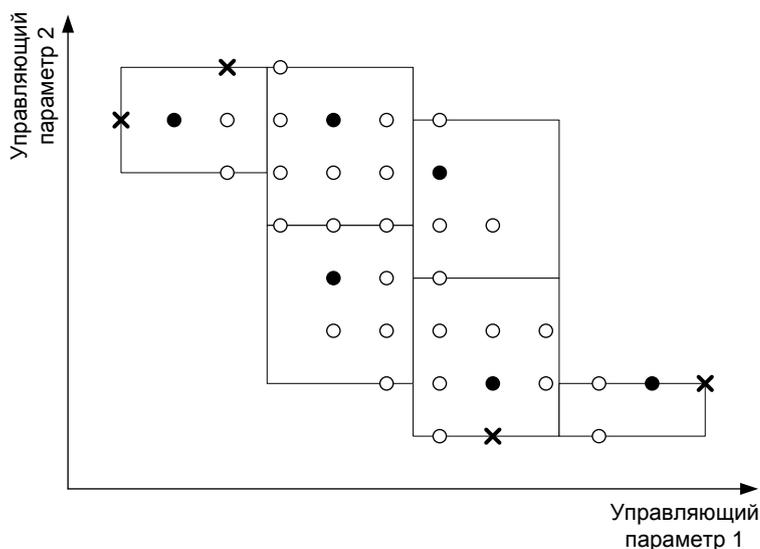


Рис. 2. Получение подклассов для выявления итоговых результатов

Таким образом, получены итоговые (рекомендуемые) решения, которые в программной реализации представлены в виде таблицы, где строкам соответствуют разные решения, а столбцам – входные (в левой части) и выходные (в правой части) переменные (рис. 3).

|   | A                    | B                      | C         | D          | E    | F | G         | H         | I            | J                   | K |
|---|----------------------|------------------------|-----------|------------|------|---|-----------|-----------|--------------|---------------------|---|
| 1 | Пр. газ(мЗТ дутья(°С | О <sub>2</sub> в дутье | Влажн. ду | Осн. шлака |      |   | Кокс(кг/т | Т фурм. о | Si в чуг.(%) |                     |   |
| 2 | 100                  | 1150                   | 22,0      | 13,0       | 1,05 |   | 501       | 1963      | 0,5          | <-- Базовый вариант |   |
| 3 | 105                  | 1100                   | 21,0      | 10,0       | 1,25 |   | 498       | 1900      | 0,2          |                     |   |
| 4 | 109                  | 1100                   | 21,0      | 8,0        | 1,25 |   | 493       | 1895      | 0,2          |                     |   |
| 5 | 109                  | 1105                   | 21,1      | 10,5       | 1,25 |   | 495       | 1893      | 0,2          |                     |   |
| 6 | 109                  | 1125                   | 21,2      | 15,0       | 1,25 |   | 496       | 1893      | 0,2          |                     |   |
| 7 | 110                  | 1105                   | 21,7      | 13,5       | 1,25 |   | 498       | 1899      | 0,2          |                     |   |
| 8 | 110                  | 1115                   | 21,2      | 12,5       | 1,25 |   | 495       | 1893      | 0,2          |                     |   |
| 9 | 110                  | 1150                   | 21,0      | 14,5       | 1,25 |   | 491       | 1899      | 0,2          |                     |   |

Рис. 3. Пример результата работы программы-советчика

В случае отсутствия возможных решений для заданных интервалов входных и выходных переменных, осуществляется поиск новых решений рассмотренным выше способом при диапазонах для управляющих и выходных переменных (блок 10, рис. 1), границы которых шире заданных ранее лицом, принимающим решения (ЛПР) и определяются технологическими ограничениями процесса и (или) модели. Если при новых интервалах решения найдены, то ЛПР предоставляется информация (на качественном уровне) в виде рекомендации о возможности корректировки ранее заданных им границ переменных.

Отметим, что разработанный алгоритм может быть использован для выбора решений применительно к другим многомерным технологическим объектам при наличии соответствующей модели.

Предложенный метод построения системы поддержки принятия решений реализован в виде программы «Советчик мастера доменной печи». Она написана на языке Delphi для платформы Win32. Интерфейс программы реализован при помощи четырех окон, в том числе основного окна, где задаются значения и интервалы управляющих и выходных величин, и окна настроек, на котором редактируется ряд дополнительных параметров, например величина шагов дискретизации. Готовая к применению программа представляет из себя один исполняемый файл размером менее 1 Мб, также для работы требуется база данных формата Excel размером до 100 Кб.

В работе получены результаты использования данной программы применительно к различным технологическим ситуациям, часть из которых представлена в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчетов с использованием разработанной СППР

| Описание проблемы  | Базовые условия   | Заданные новые условия  | Один из рекомендуемых результатов  | Оценка результата  |
|--|---|---|--|--|
| ДП №1, снижение содержания железа в рудных материалах на 2%. | $V_{nz} = 65 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна;<br>$L = 1,25$ ;<br>$T_{\delta} = 916 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;<br>$f = 12 \text{ г}/\text{м}^3$ ;<br>$Fe = 59,2$ .                     | $V_{nz} = 55-75 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна;<br>$L = 1,1-1,3$ ;<br>$T_{\delta} = 900-950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;<br>$f = 8-15 \text{ г}/\text{м}^3$ ;<br>$Fe = 57,2$ .     | $V_{nz} = 75 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна;<br>$L = 1,18$ ;<br>$T_{\delta} = 945 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;<br>$f = 9 \text{ г}/\text{м}^3$ .          | При возможности соответствующего повышения $T_{\delta}$ и $V_{nz}$ достигается $\Delta K = 1,1\%$ .  |
| ДП №1, опасность возникновения холодного хода.               | $V_{nz} = 70 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна;<br>$T_{\delta} = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;<br>$f = 13 \text{ г}/\text{м}^3$ ;<br>$Fe = 59,2$ .                                     | $V_{nz} = 60-80 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна;<br>$T_{\delta} = 900-950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;<br>$f = 8-15 \text{ г}/\text{м}^3$ ;<br>$Fe = 57,2$ .                        | $V_{nz} = 61 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна;<br>$T_{\delta} = 950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;<br>$f = 8 \text{ г}/\text{м}^3$ .                          | Приведение значений индексов теплового состояния к требуемым, повышение $T_{\phi o}$ на $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\Delta K = 1,4\%$ . |
| ДП №2, переход с выплавки передельного чугуна на ванадиевый. | $V_{nz} = 100 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна;<br>$L = 1,05$ ;<br>$T_{\delta} = 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;<br>$O_2 = 22\%$ ;<br>$f = 13 \text{ г}/\text{м}^3$ ;<br>$Fe = 58,2$ . | $V_{nz} = 90-110 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна;<br>$L = 1,25$ ;<br>$T_{\delta} = 1100-1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;<br>$O_2 = 21-22\%$ ;<br>$f = 8-15 \text{ г}/\text{м}^3$ . | $V_{nz} = 109 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна;<br>$T_{\delta} = 1105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;<br>$O_2 = 21,1\%$ ;<br>$f = 10,5 \text{ г}/\text{м}^3$ . | Удалось достичь необходимых показателей, в том числе снижения $T_{\phi o}$ на $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\Delta K = 1,2\%$ .           |
| ДП №2, опасность возникновения горячего хода.                | $V_{nz} = 100 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна;<br>$L = 1,25$ ;<br>$T_{\delta} = 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;<br>$O_2 = 23\%$ ;<br>$f = 10 \text{ г}/\text{м}^3$ ;<br>$Fe = 58,2$ . | $V_{nz} = 90-110 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна;<br>$T_{\delta} = 1140-1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;<br>$f = 8-15 \text{ г}/\text{м}^3$ .                                      | $V_{nz} = 110 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна;<br>$T_{\delta} = 1145 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;<br>$f = 15 \text{ г}/\text{м}^3$ .                       | Приведение значений индексов теплового состояния к требуемым, снижение $T_{\phi o}$ на $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\Delta K = 0,8\%$ .  |

В табл. 1 приняты следующие обозначения: ДП №1 – доменная печь объемом  $225 \text{ м}^3$  без возможности обогащения дутья кислородом (условия Чусовского металлургического завода); ДП №2 – доменная печь объемом

1719 м<sup>3</sup>(условия Нижнетагильского металлургического комбината);  $V_{ng}$  – расход природного газа;  $O_2$  – содержание кислорода в дутье;  $T_d$  – температура дутья;  $f$  – влажность дутья;  $Fe$  – содержание железа в рудных материалах;  $L$  – основность шлака;  $\Delta K$  – величина снижения расхода кокса;  $\Delta P$  – повышение производительности;  $\Delta S$  – величина снижения количества шлака;  $T_{\phi o}$  – температура фурменного очага.

**Глава 4** посвящена проблеме построения тестовой системы для оценки компетентности специалистов доменного производства. Для построения первоначальной иерархии разделов тестирования использованы положения системного анализа, рассмотренные в главе 2. На рис. 4 приведена глобальная цель и схема ее разбиения в соответствии с формальными моделями.

При использовании предлагаемой методики на втором уровне получаем, что основным является доменный процесс (прежде всего это движение материалов и газов в печи, соответствующие физико-химические процессы), к числу вспомогательных относятся такие процессы, как подача шихты, подача дутья, отвод колошникового газа, выпуск и транспортировка чугуна и шлака, ряд других.

На третьем уровне формулируется по две подцели:

- оценка компетентности персонала по вопросам управления соответствующим процессом;
- оценка компетентности персонала по вопросам реализации процесса.



Рис. 4. Схема формирования иерархии разделов тестовых заданий

Для оценки навыков по управлению процессом на четвертом уровне предлагается использовать следующие компоненты содержательной модели жизненного цикла принятия решений:

- 1) анализ информации;
- 2) формулировка проблемной ситуации, прогнозирование развития ситуации;
- 3) формирование целей, определение критериев;
- 4) формирование множества вариантов решений, выбор наилучшего решения;
- 5) реализация выбранного решения.

Функция «Оценка компетентности персонала по вопросам реализации процесса» в общем виде может быть реализована путем использования следующих составляющих цикла осуществления процесса:

- 1) подача ингредиентов;
- 2) перемещение ингредиентов;
- 3) реализация физико-химических процессов;
- 4) контроль за протеканием этих процессов;
- 5) получение выходных продуктов, контроль качества продуктов;
- б) вывод продуктов во внешнюю среду, использование их в последующих процессах.

При необходимости для каждого этапа цикла принятия решения и для этапов реализации технологического процесса на пятом уровне выделяются дополнительные разделы. На нижнем уровне иерархии формируются тестовые задания.

Для построения иерархии разделов, основанной на сформулированных выше теоретических положениях, и формирования тестовых заданий разработана компьютерная программа Experts Inquiry. В ней предусмотрены возможности редактирования, удаления и добавления компонентов дерева, оценки их важности. Для хранения информации используется база данных формата MS Access, которая содержит 8 таблиц. В ней содержатся наименования разделов тестирования, формулировки тестовых заданий и варианты ответов, информация о связях между различными темами и заданиями, баллы, характеризующие важность разделов, информация об экспертах. Формирование тестового задания одного из четырех типов реализовано в программе в виде диалога. В результате применения этой программы с помощью экспертов получено дерево тем, на нижнем уровне которого сформулировано 38 групп, каждая из которых включает до 10 заданий.

Для определения важности тем тестирования используется метод балльной оценки. После окончания работы экспертов находятся итоговые показатели важности тем. На основании полученных величин каждой теме и заданию ставится в соответствие определенный весовой коэффициент.

Для проведения тестирования используется существующая программа АСТ-Тест.

Разработанные задания использованы для оценки знаний студентов УрФУ и сотрудников НТМК. В диссертации приведены результаты тестирования специалистов производства и студентов ВУЗа. Для работников производства получены средневзвешенные оценки тем второго уровня от 0,68 до 0,8, а для студентов от 0,58 до 0,74. Средняя интегральная оценка составила, соответственно, 0,75 и 0,66. Набор сформированных тестовых заданий представлен в приложении к диссертации.

**В заключительной части** диссертации сформулированы общие выводы и приведены основные результаты, полученные в ходе работы.

1. Предложена методика формирования множества параметров и переменных многомерного технологического объекта, применяемых для его описания, построения модели объекта или обоснования ее выбора из числа существующих, позволяющая структурировать это множество и обеспечить его полноту. С использованием данной методики обоснован выбор модели доменного процесса, разработанной в Институте металлургии УрО РАН, показана необходимость ее модернизации путем введения новых переменных.

2. Разработаны алгоритмы расчетов индексов теплового состояния доменной печи на основе данных, используемых в модели доменного процесса, программная реализация которых введена в состав модели, что обеспечивает новые возможности по управлению тепловыми процессами печи, позволяющие снизить риск возникновения аварий и расстройств.

3. Разработан эвристический алгоритм классификации множества значений управляющих воздействий на заданное число классов, а также формирования рекомендуемых вариантов их сочетаний, обеспечивающий выбор решений по управлению доменным процессом с заданной погрешностью в течение допустимого промежутка времени.

4. Предложена структура системы поддержки принятия решений, основанная на использовании модифицированной модели доменного процесса, и использующая разработанные алгоритмы классификации и выбора управляющих воздействий, оптимизирующих, с некоторой погрешностью, предложенный векторный критерий эффективности. Использование данной процедуры для оперативного управления доменной печью позволяет за допустимое время сформировать ограниченное число вариантов субоптимальных решений по заданному критерию эффективности и представить их лицу, принимающему решение. Разработанную СППР отличает универсальность и простота настройки.

5. Сформированы рекомендации по использованию в доменных печах увлажненного пылеугольного топлива, что является особенно актуальным для отечественной металлургической промышленности. Получены зависимости расхода кокса, температур фурменного очага и колошникового газа от количества подаваемой угольной пыли и содержания в ней влаги. Проведенная в работе оценка подтвердила экономическую эффективность

замены природного газа и части кокса пылеугольным топливом, в том числе увлажненным, в условиях доменных печей России.

6. Разработана методика формирования структуры теста и набора тестовых заданий на основе методологии системного анализа, позволяющая создать обоснованный тест для всесторонней оценки уровня компетентности персонала доменного производства, что, в свою очередь, позволяет повысить качество подготовки персонала.

7. Разработанные алгоритмы системы поддержки принятия решений реализованы в виде программного комплекса «Советчик мастера доменной печи» и используются в доменном цехе Чусовского металлургического завода для формирования рекомендаций по управлению доменной печью, что повысило качество и уменьшило время выбора решений мастером доменной печи. Этот же программный комплекс используется в отделе подготовки кадров на Нижнетагильском металлургическом комбинате (НТМК) и в Уральском федеральном университете имени первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ) для повышения уровня квалификации специалистов и подготовки студентов. Результаты применения показали его эффективность для получения и закрепления практических навыков в управлении доменной печью.

8. Разработана программа «Experts Inquiry», которая реализует предложенную методику создания и редактирования тестов с помощью экспертов, упрощает и конкретизирует работу по созданию качественного набора тестовых заданий. Данная программа и созданные с ее помощью банки тестовых заданий используются для оценки компетентности персонала доменного производства НТМК и студентов УрФУ.

Использование практических результатов подтверждено актами внедрения.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Сучков А.В. Проблемы построения системы поддержки принятия решений для доменного производства / А.В. Сучков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5. – № 10. – С. 72-81.
2. Сучков А.В. Реализация системы поддержки принятия решений в доменном производстве / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 5. Управление, вычислительная техника и информатика. – С. 93-98.
3. Сучков А.В. Алгоритмическое и программное обеспечение системы поддержки принятия решений в доменном производстве / А.В. Сучков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – № 2(20). – С. 148-153.
4. Сучков А.В. Подход к формированию перечня параметров модели многомерного технологического объекта на примере доменной печи / А.В.

Сучков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6. – № 9. – С. 54-57.

**В других изданиях:**

5. Сучков А.В. Анализ проблемы оценки компетентности персонала доменных печей и предлагаемые пути ее решения / А.В. Сучков // Труды международной научно-практической конференции «Топливо-металлургический комплекс», 23 марта 2007 г. – Екатеринбург: Изд-во «Инженерная мысль», 2007. – С. 317-320.
6. Сучков А.В. Подход к разработке компьютерного тренажера для повышения и оценки квалификации персонала доменных печей на основе математической модели / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко // Наука и производство Урала: Сборник трудов межрегиональной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Новотроицк: НФ МИСиС, 2007. – С. 92-96.
7. Морозова В.А. Развитие логико-количественных экспертных систем для управления (в режиме советчика) энерго-экологоэффективными процессами в металлургии в сочетании с экспертной системой оценки профессиональной подготовки персонала / В.А. Морозова, В.Г. Лисиенко, А.В. Сучков, А.Е. Пареньков // Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании: Сборник тезисов международной научной конференции. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2007. – С. 290–292.
8. Морозова В.А. Использование когнитивного моделирования при разработке логико-количественных экспертных систем / В.А. Морозова, В.Г. Лисиенко, А.В. Сучков // Научные труды международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2008» в рамках 5-го Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2008». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2008. – С. 75-78.
9. Сучков А.В. Разработка программы-советчика для мастера доменной печи на основе математической модели печи / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко // Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании. Тезисы докладов 3-й Международной научной конференции. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – С. 204-205.
10. Сучков А.В. Обеспечение качества металла и оптимальное управление его производством для нужд машиностроения на примере доменного производства / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко // Научные труды XV международной научной конференции молодых ученых: сборник статей. В 3 ч. – Екатеринбург: УГТУ - УПИ, 2009. Ч. 3. – С. 183-186.
11. Сучков А.В. Исследование работы доменных печей при вдувании угольной пыли / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко, А.Н. Дмитриев // Творческое наследие Б.И. Китаева: труды междунар. науч.-практ. конф. 11-14 февраля 2009 г. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 267-274.
12. Лисиенко В.Г. Особенности математических моделей и методов формализации при построении логико-количественных экспертных систем / В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова, А.В. Сучков // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии. / Сборник материалов четвертой

Всероссийской научно-практической конференции. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – С. 229–238.

13. Сучков А.В. Усовершенствование математической модели доменной печи и построение детерминированного советчика мастера доменной печи / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова, А.В. Огаров // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: труды VII Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – С. 252–256.

14. Лисиенко В.Г. Развитие модельной поддержки экспертных систем управления энергонасыщенными объектами / В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова, А.В. Сучков, А.В. Огаров // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: Межвуз. сб. научн. тр. / Под ред. Б.Н. Парсункина. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. – С. 4–19.

15. Сучков А.В. Построение программы-советчика как этап на пути реализации верхнего уровня АСУ-ТП доменной печи / А.В. Сучков // Труды VI межотраслевой научно-технической конференции «Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли». – Новоуральск: издательство НГТИ, 2009. – С. 55-58.

16. Лисиенко В.Г. Комплексная система оценки и повышения квалификации персонала доменного производства как пример решения ряда ключевых задач инженерной психологии / В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова, А.В. Сучков // Успехи современного естествознания. – 2010. – № 1. – С. 119–124.