

Солодов Сергей Владимирович

Разработка методики когнитивного моделирования и  
математического обеспечения для компьютерно-тренинговых  
систем подготовки оперативно-технологического персонала в  
металлургии

Специальность: 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка  
информации (металлургия)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2007

Работа выполнена на кафедре автоматизированных систем управления Государственного технологического университета «Московский институт стали и сплавов».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Косарев В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Литвак Б.Г.  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Власов С.А.

Ведущая организация: ОАО «Черметавтоматика»

Защита состоится «\_\_\_» октября 2007 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д212.132.07 в Государственном технологическом университете «Московский институт стали и сплавов» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4, ауд. \_\_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного технологического университета «Московский институт стали и сплавов».

Автореферат разослан «\_\_\_» сентября 2007 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Калашников Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Высокие требования к качеству продукции и технологический уровень современного металлургического производства обуславливают новые, более высокие требования к профессиональной подготовке кадров металлургических предприятий. Согласно статистике МЧС аварии, первопричиной которых является человеческий фактор в среднем по промышленности, энергетике и в транспорте составляют 65 % от общего числа. Анализ квалификации оперативно-технологического персонала (ОТП) на металлургических предприятиях России показывает, что только около 30% специалистов имеют уровень квалификации, адекватный задачам и особенностям функционирования металлургических предприятий в условиях рыночной экономики. Для кардинального изменения ситуации с квалификацией кадров на предприятиях необходимы новые методы и средства повышения, текущего контроля и управления квалификацией персонала с использованием новейших компьютерных технологий обучения.

Проблему эффективного повышения квалификации ОТП можно решить при помощи использования в процессе обучения производственного персонала компьютерно-тренинговых систем (КТС), созданных на основе новых методов математического моделирования и комплексного информационного представления процесса и обеспечивающих быстрое приобретение практических навыков по управлению и эксплуатации металлургического оборудования.

Проведенный анализ показал, что для эффективного управления сложным металлургическим процессом (СМП) оперативный персонал использует разнородное информационное пространство, состоящее из числовой, лингвистической и визуальной информации. Однако в настоящее время математическое обеспечение КТС базируется в основном на применении аналитических, эмпирических и вероятностных моделей, что сужает его возможности по оценке и прогнозированию качественной информации. Поэтому для более эффективного обучения оперативно-технологического персонала при помощи КТС необходимо создать новый класс математических моделей, позволяющих моделировать полное информационно-ситуационное пространство реализации сложного металлургического процесса, в том числе визуально-образную ин-

формацию, представляющую собой когнитивные графические образы качества производимого продукта, состояния и режимов работы оборудования.

Назовем когнитивным моделированием металлургического процесса математическое описание, позволяющее моделировать полное информационное пространство управления, интегрирующее всю доступную эксплуатационному и оперативному персоналу информацию (как количественную, так и качественную), и полное пространство производственных ситуаций, включающее в себя штатные, нештатные и аварийные ситуации.

Создание методики когнитивного моделирования металлургических процессов и разработка с ее использованием компьютерно-тренинговых систем позволит повысить эффективность обучения и повышения квалификации кадров металлургических предприятий.

**Цель исследования.** Целью диссертационной работы является системное исследование способов повышения эффективности профессиональной подготовки оперативно-технологического персонала, создание методики когнитивного моделирования и математических моделей сложных металлургических процессов для КТС, позволяющих повысить квалификацию специалистов сталеплавильного и прокатного производств, улучшить качество продукции и уменьшить число аварий.

**Задачи исследования.** Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

- провести комплексный анализ проблем повышения эффективности профессиональной подготовки оперативно-технологического персонала с использованием компьютерных технологий обучения;

- разработать новую методику когнитивного моделирования для синтеза математического обеспечения КТС оперативного персонала СМП, включающую в себя: структурирование информационного и ситуационного пространства оперативной деятельности персонала СМП для когнитивного представления знаний в компьютерно-тренинговых системах; синтез структуры математического обеспечения КТС, обеспечивающей полнопространственное информационное и ситуационное представление металлургических процессов в компьютерных обучающих системах; разработку структуры математических моделей для оценки качественных характеристик металлопродукции и состояния оборудования с использованием разнородной информации (количественной и визуально-образной); разработку структуры ситуационно-обусловленной мо-

дели переходов между штатными, нештатными и аварийными режимами работы оборудования в КТС;

- с использованием методики когнитивного моделирования разработать, апробировать и практически реализовать в виде математического обеспечения КТС, математические модели процессов непрерывной разливки стали и отделки толстых листов, позволяющие эффективно повышать квалификацию специалистов сталеплавильного и прокатного производств.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования, системного анализа, теории нечетких множеств и инженерной психологии.

**Результаты, выносимые на защиту:**

- методика когнитивного моделирования сложных металлургических процессов для КТС, позволяющая повысить эффективность приобретения навыков практической деятельности с использованием компьютерно-тренинговых систем;

- способ структурного синтеза математического обеспечения КТС, обеспечивающего полнопространственное информационное и ситуационное представление металлургических процессов в компьютерных обучающих системах;

- математические модели металлургических процессов для оценки качественных характеристик металлопродукции с использованием разнородной информации, которые отсутствуют в КТС аналогичного назначения используемых для профессиональной подготовки персонала;

- новый класс ситуационно-обусловленных моделей переходов между штатными, нештатными и аварийными режимами работы оборудования в КТС;

- когнитивные математические модели процессов непрерывной разливки стали на слябовых МНЛЗ и отделки толстых листов для КТС.

**Научная новизна** диссертации состоит в следующих положениях:

- разработана новая методика когнитивного моделирования сложных металлургических процессов для КТС, позволяющая моделировать полное информационно-ситуационное пространство управления сложным металлургическим процессом;

- разработаны структуры математических моделей для оценивания качества металлопродукции с использованием разнородной количественной и визуально-образной информации, что позволяет сформировать у обучаемого

когнитивный образ причинно-следственной взаимосвязи полного комплекса параметров процесса с качественными характеристиками продукта;

- разработан новый класс ситуационно-обусловленных моделей для КТС, позволяющих описать полноту реализации СМП в штатных, нештатных и аварийных режимах на основе использования процедуры экспертного оценивания вероятности переходов между режимами;

- с использованием методики когнитивного моделирования разработаны комбинированные математические модели процессов непрерывной разливки слабовых заготовок и отделки толстых листов для КТС, которые позволяют описывать влияние параметров режима управления, технического состояния оборудования и качества исходного сырья на качественные характеристики металлопродукции и режимы работы оборудования.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что разработанная методика применима для синтеза математического обеспечения КТС подготовки оперативного персонала процессов сложных металлургических производств. Разработанное на основе данной методики математическое обеспечение используется в КТС и позволяет в 1,5-2,0 раза сократить время на приобретение профессиональных знаний, повышает эффективность их усвоения. Использование КТС, разработанных на базе данной методики, в цеховых и заводских структурах повышения квалификации персонала значительно сокращает количество брака и беззаказной продукции, а также число аварий.

**Внедрение результатов.** Как законченные программные продукты результаты диссертационной работы внедрены в учебных центрах и цеховых структурах обучения ЛПЦ-3 и ККЦ-1 ОАО «Северсталь» в виде компьютерно-тренинговых обучающих систем: «Стан 5000» и «Непрерывная разливка стали».

**Апробация работы.** Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях: научно-практическая отраслевая конференция «Системы автоматизированного управления производствами, предприятиями и организациями горнометаллургического комплекса» (Старый Оскол, 2003); VII региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и соискателей «Молодые ученые – науке, образованию, производству» (Старый Оскол, 2004); Международная научная конференция «Образование, наука, производство и управление в XXI веке (Старый Оскол, 2004); Международная конференция «Cognitive Modeling in Linguistics - 2005»

(Болгария, г. Варна, 2005); Всероссийская научно-практическая конференция «Образовательная среда сегодня и завтра» (Всероссийский форум «Образовательная среда-2005», Москва, ВВЦ); Институтская научно-технической конференции «62-е дни науки студентов МИСиС» (Москва, 2007).

**Публикации.** Основные положения диссертации отражены в 8 опубликованных научных работах. Из них в списке литературы приведены 2 статьи из перечня периодических журналов, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационных исследований. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в следующем: в работе [3] предложены методы использования когнитивной графики и формализации экспертных знаний оперативного персонала для построения математических моделей КТС; в работах [1, 5] разработана структура математической модели для прогнозирования качества непрерывнолитой слябовой заготовки и моделирования аварийных ситуаций; в работе [2] разработана структура математической модели прогнозирования неплоскостности толстых листов при операциях отделки; в работе [4] проанализирована эффективность использования КТС в прокатном производстве; в работах [6-8] разработано когнитивное математическое обеспечение компьютерно-тренинговых систем для обучения специалистов прокатных производств.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 118 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка, 9 таблиц, список литературы из 116 наименований и 2 приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, представлены основные научные результаты, выносимые на защиту и практическая ценность исследований.

**В первой главе** проведено системное исследование проблем повышения эффективности профессиональной подготовки оперативно-технологического персонала.

На основе анализа причин ошибочных действий персонала при помощи когнитивного подхода к исследованию человеко-машинных систем, показано, что 39 % ошибок происходит из-за неадекватной оценки причины нарушений и

неполноты наблюдений за состоянием процесса, т.е. по причине неполноты знаний о качественных характеристиках объекта.

Проведенный анализ полноты моделируемого информационно-ситуационного пространства реализации технологических процессов в КТС специалистов металлургического производства и энергетики выявил недостатки известных моделей, которые заключаются в отсутствии моделирования качественных показателей процесса (качество продукта и состояние оборудования), что сужает возможность применения существующих методик для создания математических моделей СМП для КТС.

Показано, что тренинг в большинстве КТС для профессиональной подготовки основан на бихевиористской теории, согласно которой обучение специалистов строится на базе чисто механических принципов выполнения учебно-тренировочных задач, соответствующих штатным, нештатным и аварийным ситуациям без возможностей переходов между ними.

Предложено для решения проблемы подготовки кадров разработать новый класс КТС на основе методики когнитивного моделирования, которая позволяет описывать полное информационно-ситуационное пространство оперативного управления СМП. Для реализации полнопространственного информационно-ситуационного представления СМП в КТС предложено описывать переходы между штатными, нештатными и аварийными ситуациями, производить моделирование качественной информации (состояние оборудования и качество продукта) и использовать для ее визуального представления когнитивные графические образы, которые являются средством передачи знаний о качественных характеристиках объекта. Для прогнозирования качественной информации предложено использовать математический аппарат на основе нечеткой логики.

**Во второй главе** на основе результатов проведенного комплексного анализа проблем повышения эффективности профессиональной подготовки оперативно-технологического персонала с использованием компьютерных технологий обучения формулируются основные положения методики когнитивного моделирования сложных металлургических процессов.

Задача повышения эффективности решений принимаемых ОТП при управлении металлургическим оборудованием, является комплексной, так как она зависит от общей организации производства, удобства эксплуатации системы управления технологическим процессом (эргономики) и др. В рамках



диссертационной работы рассматривается разработка методики когнитивного моделирования СМП, которая позволит уменьшить число ошибок ОТП из-за недостатка информации о качественных показателях процесса.

Формальную постановку задачи разработки класса когнитивных математических моделей для КТС можно сформулировать следующим образом: на основе разнородного информационного пространства сложного металлургического процесса  $I=I_1 \times I_2 \times I_3$ , ситуационного пространства  $S=S_1 \times S_2 \times S_3$ , и множества дефектов  $D=\{D_1, D_2, \dots, D_K\}$ , получаемых при производстве металлопродукции, требуется разработать набор математических описаний процессов дефектообразования, использующих разнородную информацию  $M = \bigcup_{i=1}^n M_i$ , и

класс ситуационных моделей  $G$ , описывающих переходы между штатными, нештатными режимами и аварийными ситуациями, где  $I_1$  – множество показаний приборов;  $I_2$  – множество данных визуального наблюдения;  $I_3$  – множество данных протокольной информации;  $S_1, S_2, S_3$  – множество штатных, нештатных и аварийных ситуаций процесса;  $M$  – математическое описание полного комплекса моделей оценки качества продукции;  $M_i$  – математическая модель  $i$ -ой структуры для оценивания качества металлопродукции;  $n$  – общее число типовых математических моделей;  $G$  – ситуационная модель, описывающая переходы между штатными, нештатными режимами и аварийными ситуациями.

Отмечено, что при управлении СМП одновременно используется разнородная информация: точечные замеры значений параметров, статистические законы распределения для отдельных величин, лингвистические критерии и ограничения, полученные от специалистов-экспертов и т.д. Исходя из этого, предложено структуру когнитивного математического описания сложного металлургического процесса для КТС представлять как совокупность математических описаний:

$$M = \left[ \left[ \bigcup_{i=1}^N M_i^{\text{экс}} \right] \cup \left[ \bigcup_{j=1}^J M_j^{\text{а}} \right] \cup \left[ \bigcup_{k=1}^K M_k^{\text{эмп}} \right] \right] \cup \left[ \bigcup_{l=1}^L G_l \right],$$

где  $M$  – математическое описание СМП;  $M_i^{\text{экс}}, M_j^{\text{а}}, M_k^{\text{эмп}}$  – математические описания для моделирования информационного пространства в виде экспертных, аналитических и эмпирических моделей;  $G_l$  – ситуационная модель процесса;  $N, J, K, L$  – общее число моделей.

Предложено для моделирования качественных показателей, характеризующих состояние металлопродукции и оборудования, использовать экспертные модели, а также их комбинации с аналитическими и эмпирическими моделями. Для описания дефектов металлопродукции и оборудования предложено использовать кортеж вида:  $D_k = \langle \text{«тип дефекта»}, \text{«степень развития дефекта»} \rangle$ .

Для представления измеряемой в ходе процесса информации и описания влияния динамических характеристик протекающих процессов на качество металлопродукции разработана структура аналитико-экспертной модели, представленная на рис.1.

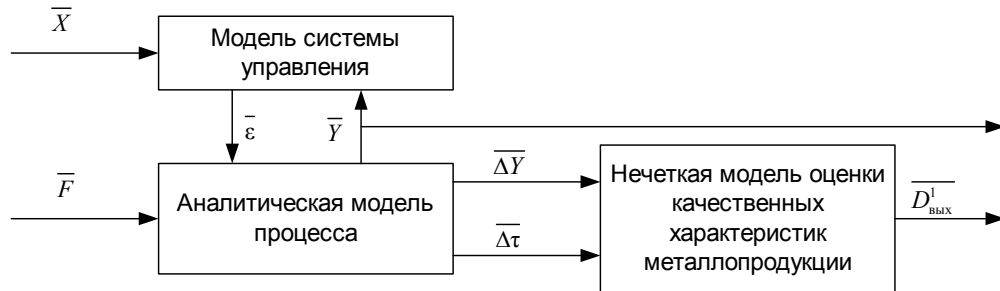


Рис.1. Структура аналитико-экспертной модели оценивания качества металлопродукции

Модель системы управления формирует вектор управляющих воздействий  $\bar{\varepsilon}$  на основе значений вектора задающих воздействий  $\bar{X}$ , вектора возмущающих воздействий  $\bar{F}$  и промоделированных значений параметров режима управления  $\bar{Y}$ , стабилизируемых при управлении процессом. Нечеткий сегмент модели строится на основе когнитивных представлений оперативного персонала о влиянии на качество металлопродукции  $\bar{D}_{\text{вых}}^1$  отклонений измеряемых параметров режима управления  $\bar{Y}$  от заданных значений  $\bar{X}$ . Векторы  $\bar{Y}$  и  $\bar{D}_{\text{вых}}^1$  являются составной частью разнородного информационного пространства при когнитивном моделировании. Нечеткий сегмент аналитико-экспертной модели оценивания качества металлопродукции представляет собой систему для расчета веса дефекта  $\bar{D}_{\text{вых}}^1$  по значениям  $\Delta y$  и  $\Delta \tau$ :

$$M_1^D = \left\{ \text{«Дефект продукции»}, \langle \Delta Y, \Delta \tau, \bar{D}_{\text{вых}}^1 \rangle, R \right\},$$

где  $\Delta Y, \Delta \tau$  - входные наборы лингвистических переменных «отклонение значения» и «время отклонения»;  $\bar{D}_{\text{вых}}^1$  - вектор выходных лингвистических переменных.

ных «качество продукции», рассчитываемых аналитико-экспертной моделью;  $R$  - база знаний.

Для моделирования косвенно вычисляемой информации, характеризующей состояние не полностью наблюдаемого металлургического процесса и описания ее взаимосвязи с качеством металлопродукции, разработана структура эмпирико-продукционной модели, представленная на рис.2.

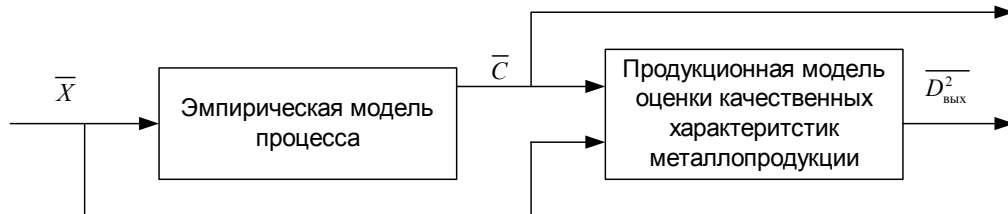


Рис.2 Структура эмпирико-продукционной модели оценивания качества металлопродукции

В эмпирическом сегменте модели на основе вектора задающих воздействий  $\bar{X}$  рассчитывается вектор состояния  $\bar{C}$  не полностью наблюдаемого объекта, который содержит исходные данные для оценивания качества металлопродукции в продукционном сегменте эмпирико-продукционной модели. Продукционный сегмент модели строится на основе статистической информации о взаимосвязи косвенно вычисляемых параметров процесса и качества металлопродукции:

$$M_2^D = \{ \text{"Дефект продукции"}, < \bar{X}, \bar{C}, \bar{D}_{\text{вых}}^2 >, R \},$$

где  $\bar{C}$  - вектор косвенно вычисляемой информации, характеризующей состояние объекта;  $\bar{D}_{\text{вых}}^2$  - вектор выходных лингвистических переменных «качество продукции», рассчитываемых эмпирико-продукционной моделью.

Векторы  $\bar{C}$  и  $\bar{D}_{\text{вых}}^2$  являются составной частью разнородного информационного пространства при когнитивном моделировании.

Предложен набор структур экспертных моделей для оценивания качественных характеристик металлопродукции. Для прогнозирования дефектов металлопродукции на основе визуальной оценки качества исходного сырья разработана структура экспертной модели:

$$M_3^D = \{ \text{"Дефект продукции"}, < \bar{X}, \bar{D}_{\text{вх}}, \bar{D}_{\text{вых}}^3 >, R \},$$

где  $\bar{X}$  - вектор входных лингвистических переменных, описывающих символьную информацию;  $\bar{D}_{\text{вх}}$  - вектор входных лингвистических переменных, описы-

вающих качество исходного сырья;  $\overline{D_{\text{ВЫХ}}^3}$  - вектор выходных лингвистических переменных «качество продукции», рассчитываемых экспертной моделью.

Предложено использовать производственные модели для оценивания дефектов на основе параметров с дискретно изменяющимися значениями (например, марка стали, тип шлакообразующей смеси (ШОС)). Производственная модель имеет структуру:

$$M_4^{\text{Д}} = \{ \text{"Дефект продукции"}, < \overline{X^{\text{Д}}}, \overline{D_{\text{ВЫХ}}^4} >, R \},$$

где  $\overline{X^{\text{Д}}}$  - вектор задающих воздействий, меняющихся дискретно;  $\overline{D_{\text{ВЫХ}}^4}$  - вектор выходных переменных «качество продукции», рассчитываемых производственной моделью.

Разработана структура комбинированной экспертной модели оценивания качественных характеристик металлопродукции, представленная на рис. 3 и состоящая из производственного и нечеткого сегментов, которую предложено использовать в случае, если качество продукции характеризуется набором экспертной информации и параметров с дискретно изменяющимися значениями. Производственный сегмент модели необходим для выбора функций принадлежности лингвистических переменных, используемых в нечетком сегменте модели.

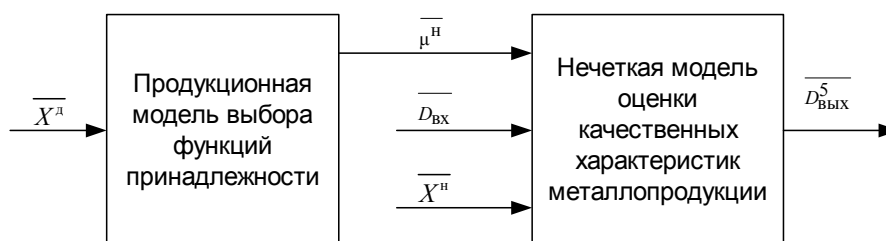


Рис. 3. Структура комбинированной экспертной модели оценивания качества металлопродукции

Представим комбинированную экспертную модель оценивания качества металлопродукции в виде системы:

$$\begin{cases} M^{\text{П}} = \{ \text{"Функции принадлежности"}, < \overline{X^{\text{Д}}}, \overline{\mu^{\text{H}}} >, R \} \\ M_5^{\text{Д}} = \{ \text{"Дефект продукции"}, < \overline{\mu^{\text{H}}}, \overline{X^{\text{Д}}}, \overline{D_{\text{ВХ}}}, \overline{D_{\text{ВЫХ}}^5} >, R \} \end{cases},$$

где  $M^{\text{П}}$  - производственный сегмент модели выбора функций принадлежности лингвистических переменных, используемых в экспертной модели;  $\overline{\mu^{\text{H}}}$  - вектор,

описывающий область определения лингвистической переменной и числовых параметров, описывающих термы;  $M_5^D$  - экспертный сегмент оценивания качества продукции;  $\overline{X^n}$  - вектор задающих воздействий, меняющихся непрерывно;  $\overline{D_{\text{вых}}^5}$  - вектор выходных лингвистических переменных «качество продукции», рассчитываемых комбинированной экспертной моделью.

Предложено представлять ситуационную модель в виде структуры, состоящей из 2-х сегментов: сценарно-обусловленной модели и ситуационно-обусловленной модели. В сценарно-обусловленной модели реализуется штатная процедура выполнения учебно-тренировочной задачи  $\overline{Pr}$ , а ситуационно-обусловленная модель описывает переходы моделируемого объекта в состояния, не предусмотренные сценарно-обусловленной моделью в случае несвоевременных действий обучаемого или некорректных значений управляющих воздействий  $\overline{U}$ . Структура взаимодействия сценарно-обусловленной и ситуационно-обусловленной моделей приведена на рис.4 .

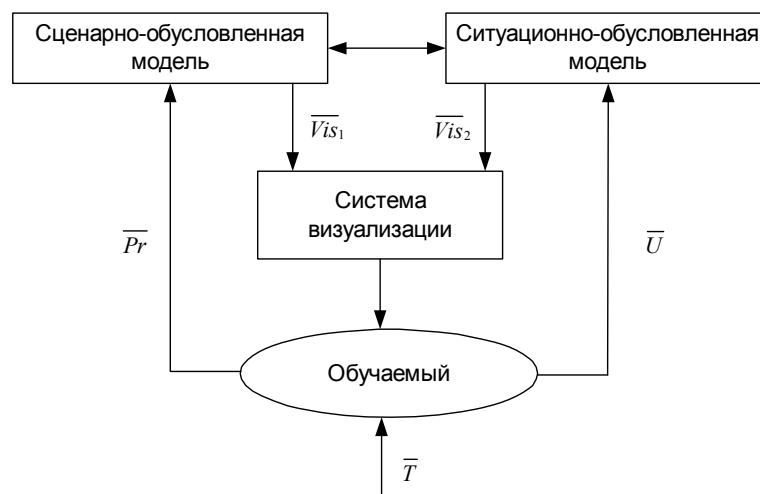


Рис. 4. Структура взаимодействия сценарно-обусловленной и ситуационно-обусловленной моделей.

Процедура выполнения учебно-тренировочной задачи, реализованная в сценарно-обусловленной модели, зависит от целей обучения, т.е. это может быть отработка как отдельных технологических операций, так и их полного комплекса, начиная от пуска оборудования в ручном режиме, дальнейшего его перевода в автоматический режим работы и последующий вывод оборудования из рабочего цикла. Кроме того, сценарно-обусловленная модель может иметь некоторые отличия для типового оборудования различных предприятий: на-

пример, при управлении МНЛЗ регулирование скорости литья может осуществлять либо разливщик, либо оператор. В тоже время характер воздействия режима управления на качество продукции и состояние оборудования в обоих случаях будет являться одним и тем же. Поэтому с точки зрения проектирования ситуационного математического описания металлургических процессов для КТС актуальность представляет лишь разработка ситуационно-обусловленной модели.

Для разработки ситуационно-обусловленной модели необходимо подобрать конечный набор выходных координат  $\bar{E}$ , характеризующих состояние объекта. В общем случае выходными координатами могут являться параметры из набора  $\langle \bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z} \rangle$ , где  $\bar{X}$  - вектор задающих воздействий;  $\bar{Y}$  - вектор выходных параметров системы управления процессом;  $\bar{Z}$  - вектор косвенно вычисляемых параметров процесса.

Полному ситуационному пространству исследуемого объекта сопоставляется структура, представляемая в виде графа, каждая вершина которого характеризует определенную технологическую ситуацию. Таким образом, процесс составления ситуационно-обусловленной модели сводится к построению полного графа первопричин для каждой ситуации на основании анализа процесса. В общем виде граф первопричин аварийных и нештатных ситуаций представлен на рис.5.

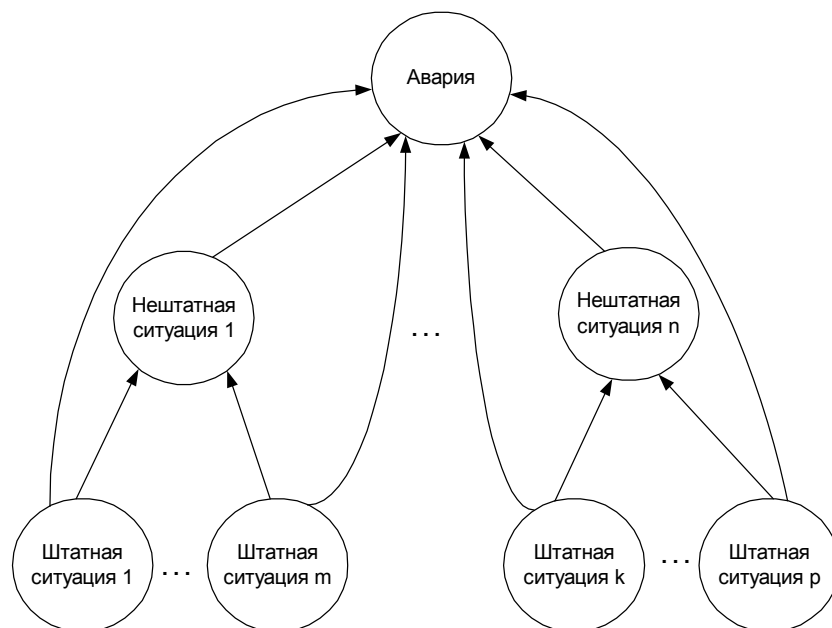


Рис. 5. Граф первопричин нештатных и аварийных ситуаций

Граф составляется исходя из принципов, что каждой аварийной ситуации предшествует либо штатная, либо нештатная ситуация, а переходу в новое состояние способствуют действия ОТП по настройке оборудования либо управлению процессом.

Будем называть состояниями штатные, нештатные и аварийные ситуации, изображенные на графе первопричин. Таким образом, общее количество состояний, описываемых графом, равно:  $N = p + n + 1$ .

Формализацию знаний о возникновении нештатных и аварийных ситуаций предложено проводить с использованием метода экспертного оценивания вероятности перехода объекта в нештатный режим функционирования. Представим процедуру экспертного оценивания вероятности перехода объекта в нештатный или аварийный режим функционирования следующим образом: для каждого из состояний изображенных на графе строится таблица правил нечетких продукций, отражающая вероятности переходов в следующие состояния. Перед этим на основе анализа процесса исключаются выходные координаты состояния объекта, не участвующие в переходах из текущего состояния, и для каждого  $j$  – го состояния объекта  $P^j$  (где  $j=1 \dots N$ ) формируется набор выходных координат  $\overline{E^j}$ . Далее формируется матрица переходов  $P[N \times N]$ , описывающая возможные переходы из  $j$  – го состояния:

$$P[N \times N] = \begin{bmatrix} p^{11} & . & p^{1k} & . & p^{1N} \\ . & . & . & . & . \\ p^{j1} & . & p^{jk} & . & p^{jN} \\ . & . & . & . & . \\ p^{N1} & . & p^{Nk} & . & p^{NN} \end{bmatrix}.$$

Строки матрицы представляют собой векторы переходов из  $j$  – го состояния объекта, а каждый элемент в строке – возможность перехода в следующее состояние, который может принимать значения «0», если переход невозможен, либо «1», если переход осуществим:

$$p^{jk} = \begin{cases} 0, & \text{переход невозможен} \\ 1, & \text{переход возможен} \end{cases}.$$

Таким образом, для каждого  $j$ -го состояния  $P^j$  существует набор посылок  $\overline{E^j}$ , описывающих вероятность набора заключений  $\overline{S^j}$ , т.е. переходов из  $j$ -го состояния в другое или вероятность того, что объект останется в том же состоянии:  $\overline{E^j} \rightarrow \overline{S^j}$ .

Предложено в качестве терм-множества лингвистической переменной «вероятность перехода» использовать множество  $T^S = \{\text{«практически невозможно»}, \text{«мало вероятно»}, \text{«вероятно»}, \text{«весьма вероятно»}\}$  или в символическом виде  $T^S = \{Z, PS, PM, PB\}$ . Эксперты определяют лингвистическую переменную «вероятность перехода» на области определения  $X^S = [0;1]$ . Таким образом, дугам переходов из  $j$ -го графа первопричин соответствует набор лингвистических переменных  $\overline{S}^j$ . Получим экспертную ситуационно-обусловленную модель переходов:

$$G^j = \{ \text{«переход»}, < \overline{E}^j, \overline{S}^j >, R \}.$$

Переходу объекта в следующее состояние соответствует лингвистическая переменная с максимальным значением вероятности перехода  $\max[\overline{S}^j]$ .

**В третьей главе** с использованием методики когнитивного моделирования разработано математическое описание процесса непрерывного литья слэбовой заготовки для КТС.

Проведен комплексный анализ факторов, влияющих на качество слэбовой заготовки, статистики брака и аварийных простоев при непрерывной разливке стали. Выявлено, что основными видами дефектов являются неметаллические включения, трещины, пояса, брак в результате аварий, а наиболее распространенными аварийными и нештатными ситуациями - разрыв корочки заготовки и подвисяние корочки заготовки в кристаллизаторе. На основе выявленных факторов разработана структура когнитивной математической модели процесса непрерывного литья в упрощенном виде приведенная на рис. 6.

В аналитической модели металлопереноса на основе скорости разливки  $v$  и задания на разливку  $\overline{T}$  рассчитывается уровень металла в кристаллизаторе  $H_4$ , а в эмпирической модели теплообмена рассчитывается вектор  $\overline{\theta}$ , который включает в себя информацию о толщине корочки заготовки, ее температуре и прогибах корочки между роликами в зоны вторичного охлаждения (ЗВО). В ситуационной модели производится моделирование режима работы МНЛЗ  $P^j$ , т.е. оценка вероятности возникновения нештатной ситуации «подвисяние корочки заготовки» и аварийной ситуации «разрыв корочки». Кроме выше перечисленных параметров, входной информацией ситуационной модели является вектор  $\overline{Sl}$ , содержащий информацию о типе и расходе используемой шлакообразующей смеси (ШОС) и состояния ее поверхности на мениске металла в кристаллизаторе.



В блоке экспертных и продукционных моделей оценивается качество заготовки на основе полного комплекса информации о задании на разливку  $\bar{T}$ , состоянии процесса  $\bar{\theta}$ ,  $H_4$ ,  $\bar{sl}$ , настройке оборудования  $\bar{r}$ .

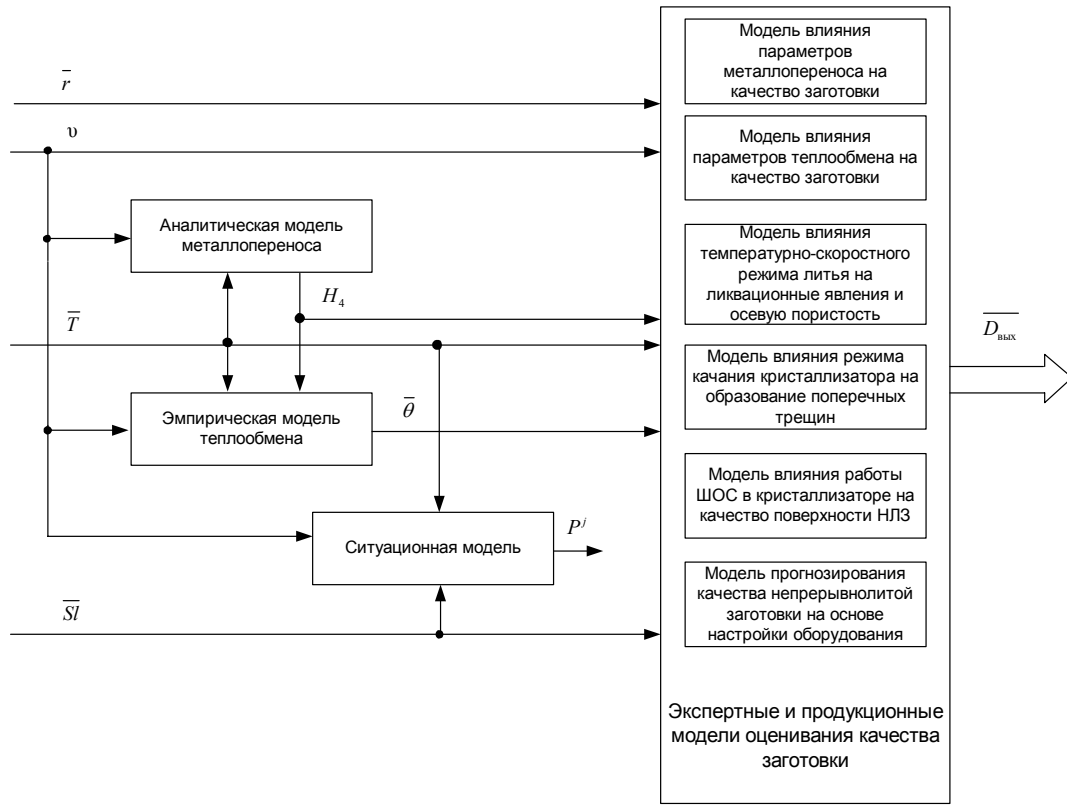


Рис.6. Структура когнитивного математического описания процесса непрерывной разливки стали для КТС.

Предложено использовать структуру аналитико-экспертной модели прогнозирования качества продукции для разработки комбинированной модели влияния параметров процесса металлопереноса на качество сляба. Разработаны нечеткие сегменты комбинированной модели для оценивания дефектов «неметаллические включения» и «ужимины», которые представлены в виде кортежей:

$$\begin{cases} M^{\text{нв}} = \{ \text{"нв"}, < \Delta H_4^{\text{нв}}, \Delta \tau, D^{\text{нв}} >, R \}, \\ M^{\text{уж}} = \{ \text{"ужимины"}, < \Delta H_4^{\text{уж}}, \Delta \tau, D^{\text{уж}} >, R \}; \end{cases}$$

где  $\Delta H_4^{\text{нв}}$ ,  $\Delta H_4^{\text{уж}}$  - входные лингвистические переменные «отклонения уровня металла в кристаллизаторе» для оценки неметаллических включений и ужимин;  $\Delta \tau$  - входная лингвистическая переменная «время отклонения уровня металла в кристаллизаторе»;  $D^{\text{нв}}$ ,  $D^{\text{уж}}$  - выходные лингвистические переменные «неметаллические включения» и «ужимины»

Предложено использовать структуру эмпирико-экспертной модели прогнозирования качества продукции для разработки комбинированной модели влияния параметров процесса теплообмена на качество сляба. Разработан производственный сегмент комбинированной модели для оценивания дефекта макроструктуры «перпендикулярные трещины», на основе относительного выпучивания корочки заготовки:

$$M^{\text{перп}} = \{ \text{«перпендикулярные трещины»}, < St, \varepsilon, D^{\text{перп}} >, R \},$$

где  $St$  – группа марок стали;  $\varepsilon$  – относительное выпучивание корочки заготовки между роликами;  $D^{\text{перп}}$  – выходная переменная отражающая степень развития трещин перпендикулярных узким и широким граням.

Для оценки влияния температурно-скоростного режима литья на развитие ликвационных явлений и осевой пористости разработана комбинированная экспертная модель, в производственном сегменте которой по марке стали и сечению заготовки  $A \times B$  производится выбор функций принадлежности, а в экспертных сегментах на основе скорости вытягивания заготовки  $v$  и перегрева стали в проковше выше температуры ликвидуса  $\Delta t$  производится расчет степеней развития дефектов «осевая ликвация»  $D^{\text{ол}}$  и «осевая пористость»  $D^{\text{оп}}$ :

$$\begin{cases} M^{\text{ол}} = \{ \text{«осевая ликвация»}, < v, \Delta t, D^{\text{ол}} >, R \}, \\ M^{\text{оп}} = \{ \text{«осевая пористость»}, < v, \Delta t, D^{\text{оп}} >, R \}; \end{cases}$$

Для прогнозирования влияния режима качания кристаллизатора на образование поперечных поверхностных трещина разработана производственная модель:

$$M^{\text{пт}} = \{ \text{«поперечные трещины»}, < v, \omega, D^{\text{пт}} >, R \},$$

где  $v$ ,  $\omega$  – входные переменные «скорость разливки» и «частота качания кристаллизатора»;  $D^{\text{пт}}$  – выходная переменная «поперечные трещины».

Для моделирования влияния работы ШОС в кристаллизаторе на качество поверхности заготовки предложено использовать экспертные и производственные модели. Разработана производственная модель, прогнозирующая возникновение дефектов «поверхностное науглероживание» и «поперечные трещины» на основе марки стали и типа ШОС:

$$M_1^{\text{шос}} = \{ \text{«работа ШОС»}, < \text{«марка стали»}, \text{«тип ШОС»}, \overline{D^{\text{шос}}} >, R \},$$

где  $M_1^{\text{шос}}$  – модель для прогнозирования дефектов заготовки, связанных с неправильным выбором типа ШОС; «марка стали» и «тип ШОС» – входные перемен-

ные модели;  $\overline{D^{\text{шос}}}$  - выходной вектор переменных модели «дефекты непрерывнолитой заготовки».

Разработана экспертная модель, описывающая влияние работы ШОС на качество заготовки:

$$M_2^{\text{шос}} = \{ \text{" работа ШОС "}, < A \times B, Q_s, \tau, D^{\text{ин}}, D^{\text{уп}}, D^{\text{п}}, D^{\text{нв}} >, R \},$$

где  $Q_s, \tau, D^{\text{ин}}$  - входные лингвистические переменные «расход ШОС», «время нештатного состояния шлака», «визуальная оценка состояния ШОС»;  $D^{\text{уп}}, D^{\text{уп}}, D^{\text{нв}}$  - выходные лингвистические переменные «угловые продольные трещины», «пояс», «неметаллические включения».

Для оценки влияния настройки оборудования на качество заготовки разработаны комбинированные экспертные модели, в производственных сегментах которых по марке стали осуществляется выбор функций принадлежности, а нечеткие сегменты представлены в виде системы:

$$\begin{cases} M^{\text{гт}} = \{ \text{" гнездообразная трещина "}, < \overline{r^1}, v, D^{\text{гт}} >, R \}, \\ M^{\text{от}} = \{ \text{" осевая трещина "}, < \overline{r^2}, v, D^{\text{от}} >, R \}; \end{cases}$$

где  $\overline{r^1}, \overline{r^2}, v$  - наборы входных лингвистических переменных: «отклонение ролика» секций ЗВО под кристаллизатором и криволинейного участков, отклонение ролика» для секций ЗВО участка правки и горизонтального участка и скорость разливки соответственно;  $D^{\text{гт}}, D^{\text{от}}$  - выходные лингвистические переменные «гнездообразная трещина» и «осевая трещина».

Для моделирования режима работы оборудования МНЛЗ разработана ситуационно-обусловленная модель, описывающая переходы в аварийную ситуацию «разрыв корочки заготовки» и нештатную ситуацию «подвисание корочки заготовки». Граф первопричин для описанных ситуаций представлен на рис. 7.

Таким образом, общее число состояний, описываемых графом,  $N=6$ .

Матрица переходов режима работы МНЛЗ в нештатные и аварийные состояния имеет вид:

$$P[6 \times 6] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

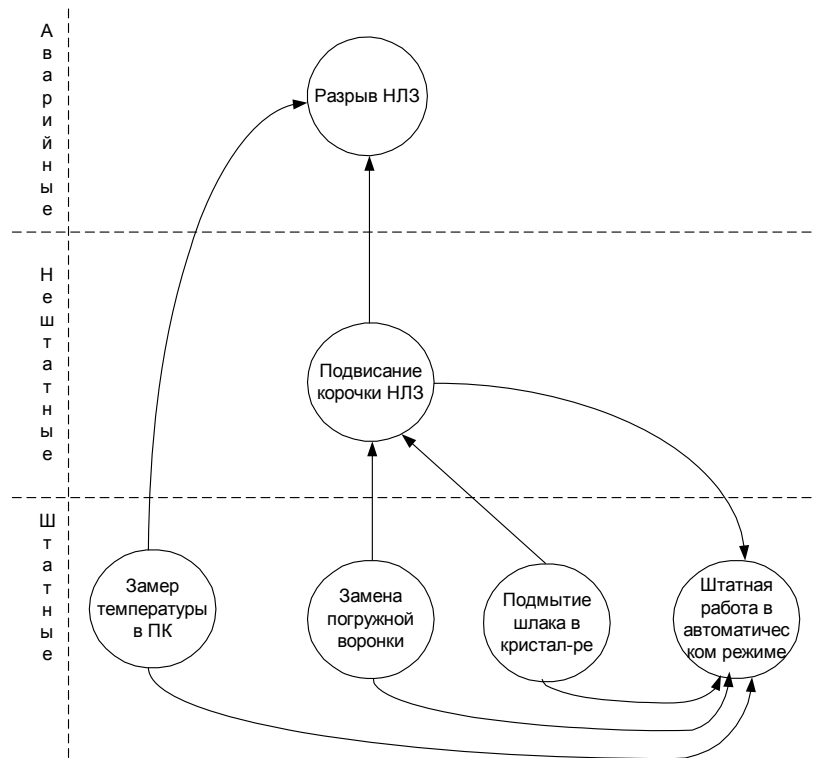


Рис.7. Граф первопричин аварийной ситуации «разрыв НЛЗ»

В первой строке матрицы, соответствующей штатной ситуации «замер температуры в ПК», описаны переходы в состояния «штатная работа в автоматическом режиме» и «разрыв заготовки».

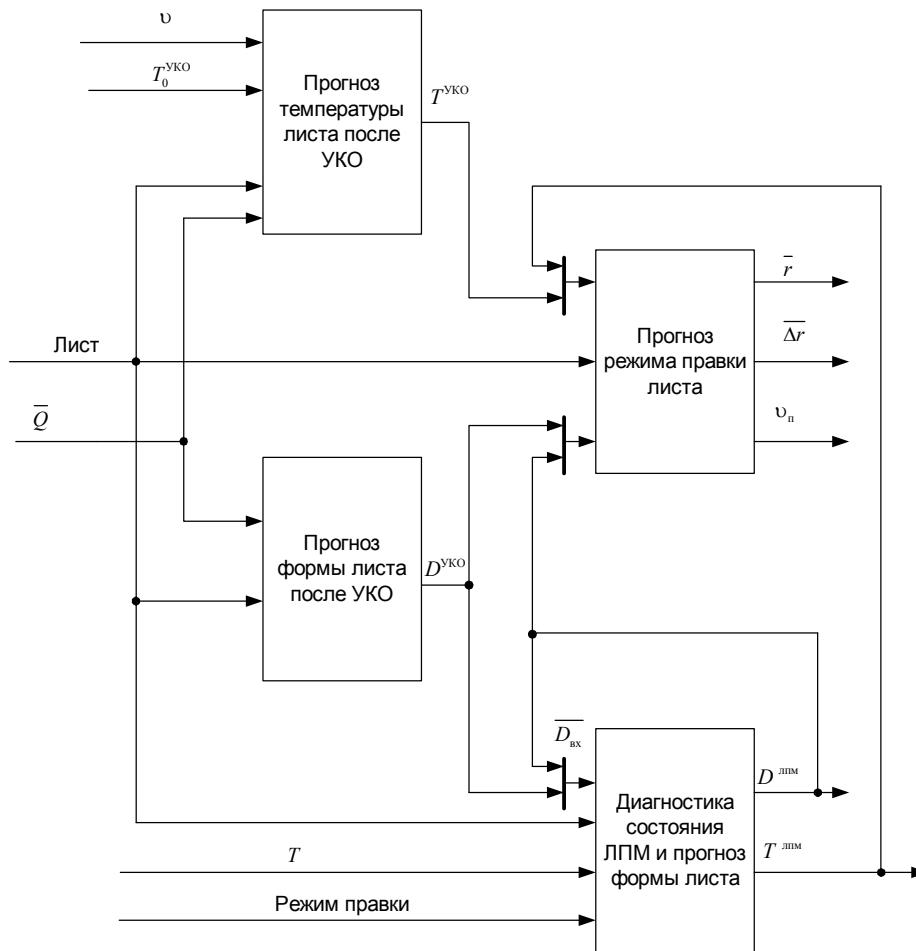
В рамках исследования ситуационного пространства рассмотрена модель переходов из состояния «замер температуры в ПК»:

$$G^1 = \{ \text{"состояние 1"}, < v, \Delta t, S^4, S^6 >, R \},$$

где  $E^1 = [v, \Delta t]$  - набор входных лингвистических переменных (посылок);  $S^1 = [S^4, S^6]$  - набор выходных лингвистических переменных (заключений), описывающих вероятность перехода в состояния «штатная работа в автоматическом режиме» и «разрыв корочки заготовки».

**В четвертой главе** методика когнитивного моделирования применена для разработки математической модели процессов отделки толстых листов после прокатки для КТС.

На основе комплексного анализа причин образования неплоскостности листов и требований, предъявляемых к качеству листового проката, разработана структура математического описания процессов ускоренного охлаждения и правки листов, представленная на рис.8.



*Рис.8. Структура когнитивного математического описания процессов отделки толстых листов*

В сегментах модели на основе управляющих воздействий производится прогнозирование неплоскостности листа  $\overline{D^{УКО}}$  и его температуры  $T^{УКО}$  после установки контролируемого охлаждения (УКО). Сегмент прогноза режима правки, являющийся связывающим между сегментами моделей процессов ускоренного охлаждения и горячей правки, прогнозирует допустимый режим правки, включающий в себя настройку правильных валков  $\overline{r}$  для штатного режима правки, отклонения в настройке правильных валков  $\overline{\Delta r}$  от штатного режима правки и скорость правки  $v_n$ . По выбранному режиму правки и неплоскостности листа после УКО прогнозируется неплоскостность листа после листопрямительной машины (ЛПМ)  $\overline{D^{ЛПМ}}$ . В случае некорректно выбранного режима правки необходима повторная правка листа и в этом случае прогноз режима правки, ведется уже по неплоскостности листа после ЛПМ.

Для оценивания неплоскостности листа после УКО разработана экспертная модель, входными переменными для которой являются соотношения рас-

ходов воды между верхними и нижними, а также между центральными и боковыми форсунками секций охлаждения:

$$M_{\text{ш}}^{\text{УКО}} = \{ \text{"форма после УКО"}, < Q_1, Q_2, \overline{D^{\text{УКО}}}, R \},$$

где  $Q_1, Q_2$  - входные лингвистические переменные «соотношение расходов верх/низ» и «соотношение расходов центр/края»,  $\overline{D^{\text{УКО}}} = [\text{«горб»}; \text{«короб»}]$  - набор выходных лингвистических переменных, описывающих степени развития неплоскостности листа после УКО.

Соотношение расходов воды между верхними и нижними коллекторами секций УКО рассчитывается по формуле:

$$Q_1 = \sum_{i=i1}^{i2} \sum_{j=j1}^{j2} \frac{Q_{ij}^{\text{в}}}{Q_{ij}^{\text{н}}},$$

где  $Q_{ij}^{\text{в}}, Q_{ij}^{\text{н}}$  - расходы воды на верх и низ секций охлаждения;  $i$  - номер секции охлаждения по длине машины;  $j$  - номер секции по ширине машины;  $i1, i2$  - номера начальной и конечной секции охлаждения по длине машины, задействованных по технологии для охлаждения листа заданной марки стали и толщины;  $j1, j2$  - номера начальной и конечной секции охлаждения по ширине машины, задействованных по технологии для охлаждения листа заданной ширины.

Соотношение расходов воды между центральными и крайними коллекторами секций УКО рассчитывается по формуле:

$$Q_2 = \frac{\sum_{i=i1}^{i2} \left( \sum_{j=j1}^{k-1} (Q_{ij}^{\text{н}} + Q_{ij}^{\text{в}}) + \sum_{j=k+1}^{j2} (Q_{ij}^{\text{н}} + Q_{ij}^{\text{в}}) \right)}{\sum_{i=i1}^{i2} (Q_{ik}^{\text{н}} + Q_{ik}^{\text{в}})},$$

где  $k$  - номер центральной (по ширине) секции охлаждения УКО.

В случае охлаждения узкого листа выражение для оценки его неплоскостности после УКО преобразуется в вид:

$$M_y^{\text{УКО}} = \{ \text{"форма после УКО"}, < Q_1, D_1^{\text{УКО}}, R \}.$$

Для расчета температуры листа после УКО разработана приближенная математическая модель на основе нормативной и эмпирической информации:

$$T^{\text{УКО}} = T_0^{\text{УКО}} \left( 1 - \sum_{i=i1}^{i2} \sum_{j=j1}^{j2} \frac{Q_{ij}^{\text{в}} + Q_{ij}^{\text{н}}}{Q_{ij}^{\text{в3}} + Q_{ij}^{\text{н3}}} \frac{v^3}{v} \frac{T^{\text{э}} \eta}{T_0^{\text{УКО}}} \right),$$

где  $T^{\text{УКО}}, T_0^{\text{УКО}}$  - температуры листа после охлаждения и до охлаждения соответственно;  $Q_{ij}^{\text{ВЭ}}, Q_{ij}^{\text{НЭ}}$  - эталонные расходы воды на верхние и нижние коллекторы секций охлаждения;  $v, v^3$  - текущая и эталонная скорости транспортировки листа через УКО;  $\eta$  - эмпирический весовой коэффициент.

Разработана модель прогнозирования допустимого режима правки, структурно состоящая из двух сегментов: сегмента прогнозирования штатного режима правки листа на основе продукционной модели  $M^{\text{шт}}$  и экспертного сегмента прогнозирования отклонений от штатного режима правки  $M^{\text{от}}$ :

$$\begin{cases} M^{\text{шт}} = \{ \text{"штатный"}, < St, b, h, T, \bar{r}, v_{\text{п}} >, R \}, \\ M^{\text{от}} = \{ \text{"отклонения"}, < h, T, \overline{D_{\text{ВХ}}}, \overline{\Delta r} >, R \}, \end{cases}$$

где  $b, h, T, \overline{D_{\text{ВХ}}}$  - входные переменные: «ширина листа», «толщина листа», «температура листа перед ЛПМ», «неплоскостность листа перед ЛПМ»;  $\bar{r}, v_{\text{п}}, \overline{\Delta r}$  - выходные переменные: «штатная настройка валков», «скорость правки» и «коррекция к настройке валков».

Для оценивания формы листа после ЛПМ разработана комбинированная экспертная модель, нечеткий сегмент которой представлен в виде:

$$M^{\text{ЛПМ}} = \{ \text{"качество правки"}, < b, h, T, k_m, \bar{r}, \overline{\Delta r}, \overline{D^{\text{ВХ}}}, \overline{D^{\text{ЛПМ}}} >, R \},$$

где  $b, h, T, k_m$  - входные лингвистические переменные: «толщина листа», «ширина листа», «температура», «показатель текучести»;  $\bar{r}, \overline{\Delta r}$  - входные векторы лингвистических переменных, соответствующих штатной настройке кассеты и коррекции к штатной настройке верхних валков кассеты;  $\overline{D^{\text{ВХ}}}$  - вектор входных лингвистических переменных, описывающих неплоскостность листа до правки;  $\overline{D^{\text{ЛПМ}}}$  - вектор выходных лингвистических переменных, описывающих неплоскостность листа после правки.

Выявлены основные аварийные и нештатные ситуации при горячей правке листов: повреждение валков, застревание листа в правильной машине, разгрузка кассеты правильной машины, на основе чего построен граф первопричин, приведенный на рис. 9. Общее число состояний графа первопричин аварийных и нештатных ситуаций при правке 4: «штатный режим», «застревание листа», «разгрузка кассеты», «повреждение валков».

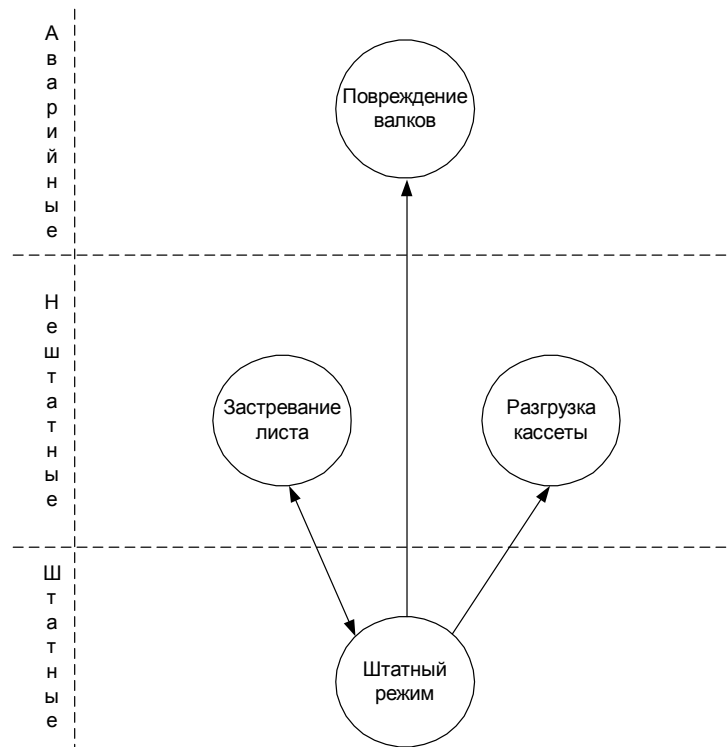


Рис.9. Граф переходов в нештатные и аварийные режимы работы ЛПМ

Матрица переходов объекта в следующие состояния имеет вид:

$$P[4 \times 4] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

В первой строке матрицы, соответствующей штатной ситуации «штатный режим», описаны возможные переходы в состояния «застревание листа», «разгрузка кассеты», «повреждение валков».

Описана модель переходов из состояния «штатный режим»:

$$G^1 = \{ \text{"состояние 1"}, < \bar{r}, \bar{\Delta r}, v, \bar{D}_{\text{вх}}, S^1, S^2, S^3, S^4 >, R \},$$

где  $\bar{E}^1 = [\bar{r}, \bar{\Delta r}, v, \bar{D}_{\text{вх}}]$  - набор входных лингвистических переменных;  
 $\bar{S}^1 = [S^1, S^2, S^3, S^4]$  - набор выходных лингвистических переменных - «вероятность перехода».



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основными результатами диссертационной работы являются:

1. Разработана методика когнитивного моделирования, позволяющая описывать полное информационно-ситуационное пространство деятельности оперативно-технологического персонала при управлении сложным металлургическим процессом, что обеспечивает повышение эффективности приобретения практических навыков и знаний с использованием компьютерно-тренинговых систем.

2. Синтезирована структура математического обеспечения для моделирования системы «оборудование - орган управления –технологический процесс - продукт», представляющая собой совокупность аналитических, эмпирических, экспертных и ситуационных моделей.

3. Разработаны структуры математических моделей для оценки качества металлопродукции на основе описания полного разнородного информационного пространства управления сложным металлургическим процессом, что позволяет сформировать у обучаемого когнитивный образ причинно-следственных взаимосвязей комплекса переменных состояния процесса с качественными характеристиками продукта.

4. Разработан новый класс ситуационно-обусловленных моделей, основанных на процедуре экспертной оценки вероятности перехода между штатными, нештатными и аварийными режимами, которая позволяет упростить разработку ситуационных моделей сложных металлургических процессов для компьютерно-тренинговых систем.

5. На основе предложенной методики когнитивного моделирования разработаны математические описания процессов непрерывной разливки стали и отделки толстых листов после прокатки для компьютерно-тренинговых систем, позволяющие описывать влияние параметров режима управления, технического состояния оборудования и качества исходного сырья на качественные характеристики металлопродукции и режимы работы оборудования.

6. Разработанные когнитивные математические модели включены в состав компьютерно-тренинговых систем «Стан 5000» и «Непрерывная разливка стали» и внедрены в учебных центрах и цеховых структурах обучения ЛПЦ-3 и ККЦ-1 ОАО «Северсталь». Использование этих систем при обучении оперативно-технологического персонала позволило обеспечить сокращение в 1,5-2,0

раза времени на профессиональную подготовку, повысить квалификацию специалистов, улучшить качество продукции и снизить число аварий.

### **Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Косарев В.А., Солодов С.В. Синтез полнопространственной модели процесса непрерывной разливки стали для многофункциональной компьютерно-тренинговой системы // Изв.вузов. Черная металлургия. – 2005. - №11. - с. 49-54.

2. Косарев В.А., Солодов С.В. Модели оценки качества продукции при отделке толстых листов // Изв.вузов. Черная металлургия – 2006. - №7.-с. 66-67.

3. Косарев В.А., Солодов С.В. О формализации лингвистической неопределенности профессиональных знаний эксплуатационно-технологического персонала сложных металлургических процессов // В сб. трудов «Обработка текста и когнитивные технологии» / Варна - 2005. - № 11. - с. 109-114.

4. Victor Kosarev, Sergey Solodov. Intellectual computer system for training of maintenance-technological personnel of hot-strip mill // Proceedings “Cognitive modeling in linguistics”/ Varna- 2005. - № 12. p. 279.

5. Солодов С.В., Косарев В.А. Разработка полнопространственной композиционной математической модели процесса разливки стали на слябовых МНЛЗ для повышения эффективности подготовки оперативно-технологического персонала с использованием компьютерных тренинговых систем // В сб. трудов «62-е дни науки студентов/ Москва, МИСиС» - 2007. – с. 300-301.

6. Косарев В.А. (РФ), Солодов С.В. (РФ), Лопатин В.Ю. (Узбекистан) и др. Интерактивная обучающая среда «Стан 5000»: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007610263 / заявитель и правообладатель ГОУ ВПО МИСиС; заявл. 14.11.2006; зарег. 12.01.2007.

7. Косарев В.А. (РФ), Солодов С.В. (РФ), Лопатин В.Ю. (Узбекистан) и др. Интерактивная обучающая среда «Стан 450»: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007613246 / заявитель и правообладатель ГОУ ВПО МИСиС; заявл. 26.04.2007; зарег. 1.08.2007.

8. Косарев В.А. (РФ), Солодов С.В. (РФ), Лопатин В.Ю. (Узбекистан) и др. Интерактивная обучающая среда «Стан 1700 ПХЛ»: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007613245 / заявитель и правообладатель ГОУ ВПО МИСиС; Заявл. 26.04.2007; зарег. 1.08.2007.