

DOI 10.21672/2074-1707.2020.49.4.033-048
УДК 004.89

ФОРМИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ ПЕРЕРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ О КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛА

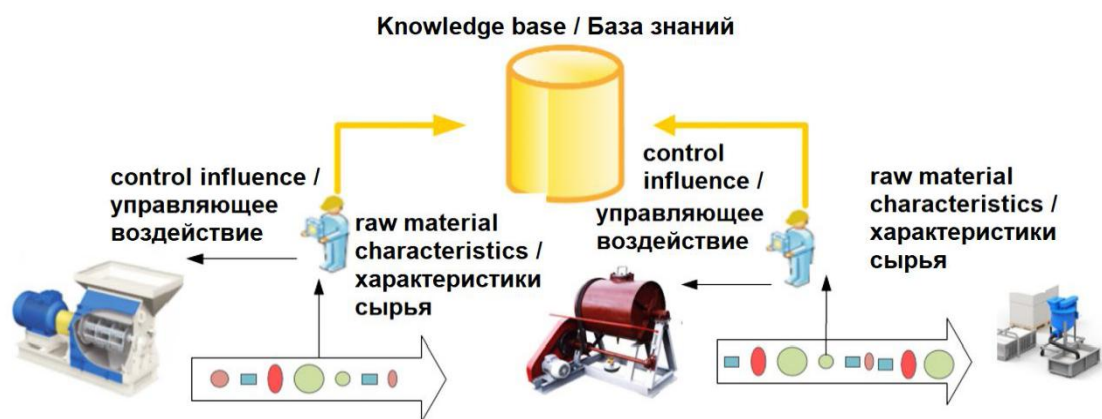
Статья поступила в редакцию 29.02.2020, в окончательном варианте – 08.03.2020.

Миловидова Анна Александровна, Государственный университет «Дубна», 141980, Российская Федерация, Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, 19, старший преподаватель, e-mail: milanna@uni-dubna.ru, ORCID: 0000-0002-6646-4508

В работе показана необходимость учета нечеткой информации о качестве материала в процессе его переработки с целью повышения эффективности функционирования промышленных предприятий. Подробно проанализирована роль и функции эксперта-технолога при принятии решений, относящихся к управлению процессом переработки. Представлено описание концепции системы поддержки принятия решений при управлении процессом переработки в условиях неопределенности информации о свойствах материала. Именно свойства материала (на основе нечетких характеристик) используются в качестве основы для формирования эффективных управленческих решений. Детально описан процесс формирования системы нечетких оценок и предложена модель базы данных и базы знаний системы поддержки принятия решений при управлении процессом переработки в условиях неопределенности. Показано применение предложенной системы оценок и модели при формировании базы нечетких знаний для системы поддержки принятия решений при управлении режимами работы классификатора в процессе обогащения железорудного концентрата.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, управление процессом переработки, неопределенность информации о качестве материала, нечеткая система оценки, база знаний

Графическая аннотация (Graphical abstract)



CREATION OF THE FUZZY MEASUREMENT SYSTEM FOR DECISION SUPPORT SYSTEM WHEN MANAGING THE PRODUCTION PROCESS IN AN UNCERTAIN INFORMATION ABOUT THE QUALITY OF THE MATERIAL BEING PROCESSED

The article was received by the editorial board on 29.02.2020, in the final version – 08.03.2020.

Milovidova Anna A., Dubna State University, 19 Universitetskaya St., Dubna, Moscow region, 141980, Russian Federation, Senior Teacher, e-mail: milanna@uni-dubna.ru, ORCID: 0000-0002-6646-4508

The necessity of accounting for fuzzy information about the quality of the material in the processing process in order to improve the functioning of industrial enterprises is shown. The role and functions of an expert technologist in making decisions in managing the production process is analyzed in detail. Description of the concept of the decision support system in the process of production control in conditions of uncertainty of information on material quality. Those material properties (based on fuzzy characteristics) are used as forming an effective management decision. The process of forming a fuzzy measurement system is described in detail and a model of the database and knowledge base of the decision support system for managing the production process in the face of uncertainty is proposed. The

application of the proposed measurement system and model is shown in the formation of a fuzzy knowledge base for a decision support system for managing the iron ore concentrate enrichment process.

Key words: decision support, managing the production process, uncertain information about the quality of the material, fuzzy measurement system, knowledge base

Введение. В перерабатывающей промышленности общим фактором неопределённости в производстве для процессов переработки (ПП) является неопределённость свойств материала (исходного сырья, промежуточного продукта и конечного продукта). Эта неопределённость сказывается на эффективности функционирования промышленного предприятия и свойств конечного продукта.

Качество сырья предопределяет режим работы и производительность оборудования, характер используемой технологии, влияет на себестоимость выпускаемой продукции [1].

ПП как объект управления можно отнести к трудно формализуемому классу объектов [8, 13], который характеризуется нестационарностью, инерционностью, запаздыванием, случайными возмущениями, нечёткой информацией [2, 3, 7, 11].

Трудности принятия решений для задач управления процессом переработки возникают в связи с нечеткой информацией о качестве материала; сложностью построения моделей и алгоритмов управления, базирующихся на точных математических методах; проблемами применения методологии и инструментария учёта человеческого фактора в непредвиденных нештатных ситуациях [12]. Применение методов теории нечетких множеств позволяет формализовать такие неопределенности [4, 5, 6, 9, 10, 14]. В связи с отсутствием прямых способов оценки качества материала огромную роль играют эксперты-технологи и базирующиеся на их опыте экспертные методы оценки качества.

Таким образом, целью исследования, приведенного в данной статье, является разработка подхода к формированию нечеткой системы оценки как инструмента поддержки принятия решений при управлении процессом переработки в условиях неопределенности информации о качестве материала.

Управление процессом переработки в условиях неопределенности. Как уже было сказано выше, в современной промышленности важную роль в управлении ПП (УПП) играет эксперт-технолог. Выполняемые им функции отражены на рисунке 1.

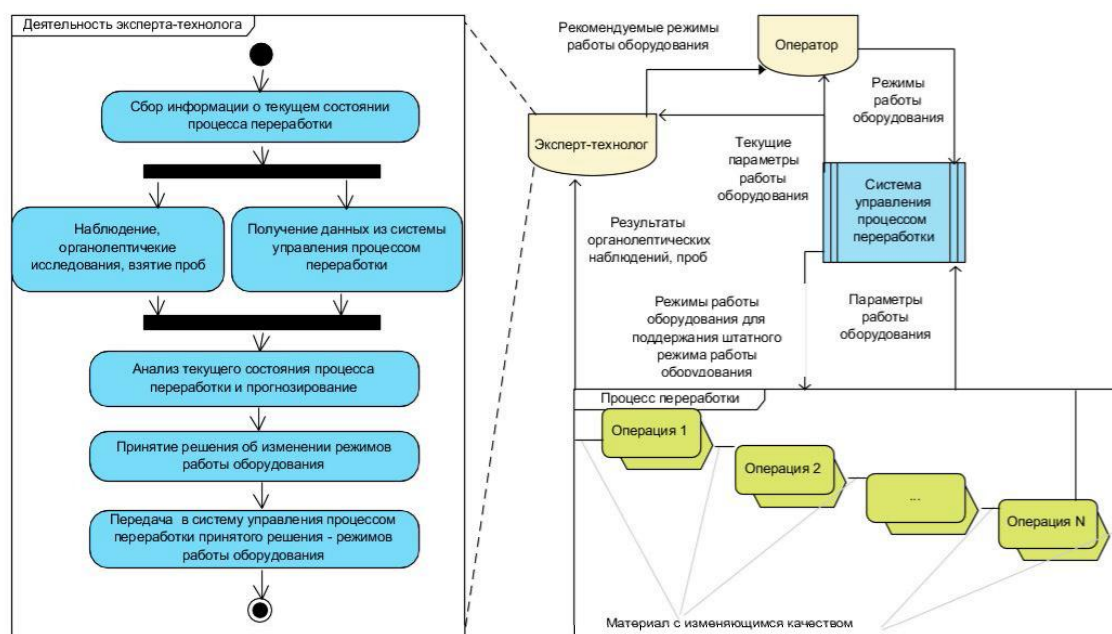


Рисунок 1 – Общая схема управления процессом переработки в условиях неопределенности информации о качестве материала

Используя свой опыт, он определяет возможное изменение качества поступающего материала или наличие форс-мажорной ситуации в производственной цепи в ходе переработки. По результатам такого определения принимается решение об изменении режимов работы оборудования. Знания, включающие основные эмпирические принципы принятия управленческих решений технологом, являются основой для системы управления ПП. Современные методы цифрового производства, обработки данных и моделирования позволяют использовать программный инструментарий извлечения, представления, обработки и формирования объективных баз знаний,

создавать имитационные модели. Исключение эксперта-технолога из непосредственного участия в УПП за счёт использования проблемно-ориентированных систем управления и предоставление технологу возможности развития и адаптации таких систем является одним из факторов перспективности данного исследования. Применение нечеткой логики в принятии решений при УПП позволит учитывать опыт и знания экспертов.

Для пространственно-распределённых процессов группы аппаратов ПП распределены на территории предприятия и связаны техническими средствами (конвейеры, спецтранспорт, трубопроводы и т.д.) переноса материала (материалов) от одной группы к другой, образуя тем самым транспортную сеть. Особенность переноса материала по сети состоит в неизменности свойств материала. В узлах ПП происходит изменение свойств материала аппаратами ПП. При этом в некоторых узлах аппараты ПП снабжены системами локального управления. Особенность принятия решений при УПП состоит в согласованном выборе локальных эффективных управляющих воздействий, обеспечивающих эффективность процесса в целом. При этом выбор управляющих переменных зависит от качества материала, движущегося от одних узлов к другим. Материал переносится указанными техническими средствами за различные времена, что приводит к необходимости прогнозировать эффективные согласованные управления для узлов (например, контактное расписание железнодорожного транспорта для металлургических предприятий). Поставим каждому узлу в соответствие агента, функции которого состоят в определении текущего состояния аппаратов ПП, свойств обрабатываемого материала, определении режимов работы аппаратов, оценке прибытия к некоторому моменту времени новой порции материала, формирования локального эффективного решения к моменту прибытия материала и согласования выработанного решения с другими агентами. Тогда создаётся возможность коллективного принятия комплексного упреждающего эффективного УПП.

Применение существующего опыта управления позволит повысить качество принятия управленческих решений за счёт саморегулирования системы управления и выработки упреждающих воздействий. Таким образом, одной из важнейших компонент системы поддержки принятия решений (СППР) при УПП является система нечеткой оценки и база знаний.

Концепция системы поддержки принятия решений при управлении процессом переработки. Процесс переработки может быть представлен множеством единиц оборудования (M); множеством связей между единицами оборудования (S); множеством локальных систем управления (MU) оборудованием (M) (например, совокупность ПИД-регуляторов, исполнительных органов); системой оценок текущего состояния ПП; системой оценки свойств материала; множеством переменных состояния для оборудования ПП $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_n)$; множеством приборов, измеряющих текущее состояние оборудования $D = (D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_n)$; множеством шкал оценки $H = (h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_n)$; типом шкал $E = \{\text{порядковая, арифметическая, целая}\}$; матрицей «прибор – шкала» (DH)

$$dh(i, j) \in DH, \text{ где } dh(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ому прибору соответствует } h_j \text{ шкала,} \\ 0, & \text{если } i\text{-ому прибору не соответствует } h_j \text{ шкала;} \end{cases}$$

матрицей «прибор – узел ответственности» (DR);

$$dr(i, j) \in DR, \text{ где } dr(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ый прибор находится в } j\text{-ом узле,} \\ 0, & \text{если } i\text{-ый прибор не находится в } j\text{-ом узле;} \end{cases}$$

матрицей «система управления – оборудование» (WM)

$$wm(i, j) \in WM, \text{ где } wm(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ое оборудование управляется} \\ & j\text{-ой локальной системой,} \\ 0, & \text{если } i\text{-ое оборудование не управляется} \\ & j\text{-ой локальной системой;} \end{cases}$$

множеством управляющих переменных $U = (u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_m)$, $u_i \in V_i$, где V_i – допустимое значение u_i ; матрицей «управление – система управления» (UW)

$$uw(i, j) \in UW, \text{ где } uw(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } u_i\text{-ое управление связано с} \\ & j\text{-ой локальной системой,} \\ 0, & \text{если } u_i\text{-ое управление не связано с} \\ & j\text{-ой локальной системой;} \end{cases}$$

характеристики исходного материала (X). $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_l)$, $x_i \in G_i$, где G_i – допустимое множество x_i .

Характеристики входного продукта являются нечёткими параметрическими переменными. Процедура фазификации входных переменных (X) осуществляется экспертами на основе опыта и группы приборов измерения (D), характеризующих состояния оборудования (Y):

- системой показателей качества процесса переработки (Q);
- системой оценки показателей качества ПП;
- матрицей «показатель – оборудование» (QM)

$$qm(i, j) \in QM, \quad \text{где } qm(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{ый показатель характеризует состояние} \\ & j - \text{ого оборудования,} \\ 0, & \text{если } i - \text{ый показатель не характеризует состояние} \\ & j - \text{ой оборудования.} \end{cases}$$

Основные положения задачи принятия решений при управлении ПП:

1) Показатели качества (Q) являются функционалами от текущего состояния всех единиц оборудования (M), текущих характеристик материала ПП (X).

2) Если известны характеристики входного материала (X) на заданном интервале времени и при этом известно начальное состояние ПП, то тогда известны эффективные режимы работы всех единиц оборудования ПП, т.е. известны эффективные значения показателей (Q^*).

3) Если входное сырьё не поступает в ПП и известно распределение материала по всей цепи ПП, тогда известны эффективные режимы работы всех единиц оборудования.

4) Если входное сырьё поступает в ПП с известными нечёткими значениями и известно распределение для качества материала, то тогда агентная система способна формировать эффективное управление режимами работы оборудования.

Для принятия решений при УПП определены: вектор текущего состояния ПП $Y(t)$; система оценки текущего состояния ПП $S_1(Y(t))$; вектор текущего состояния входного материала $X(t)$; определён класс функций $X(t)$, т.е. $X(t) \in \Omega(X(t))$; система оценки текущего качества материала в ПП $S_2(X(t))$; шкала системы оценки определена как арифметическая; вектор управления аппаратами ПП $U(t)$; переменные управления определены как нечёткие переменные; система оценки управляющих переменных вектора $U(t)$ $S_3(U(t))$; определён класс функций $U(t)$, т.е. $U(t) \in \Psi(U(t))$; вектор показателя качества ПП P_1 ; показатель качества ПП определён как нечёткая переменная; система оценки качества ПП $S_4(P_1)$; качество ПП определено как нечёткая переменная; вектор показателя качества конечного продукта ПП P_2 ; качество конечного продукта определено как нечёткая переменная; система оценки качества конечного продукта $S_5(P_2)$; достигнутый показатель качества ПП (P_1^*); достигнутый показатель качества определён как нечёткая переменная; достигнутый показатель качества конечного продукта (P_2^*); множество аппаратов ПП (R); состояние аппаратов ПП ($r_i(t)$, $i=1,2,\dots,k,\dots,N$); связи между аппаратами ПП; узлы в технологической сети, в которых изменяются переменные состояния материала; управляемые аппараты по всей схеме ПП; начальные условия ПП.

Общий критерий эффективности качества ПП (Q_1) определён как

$$Q_1 = (P_1^* - P_1)^2. \quad (1)$$

Ограничение на вектора $X(t)$, $Y(t)$:

$$W_1(X(t), Y(t)) = 0. \quad (2)$$

Общий критерий эффективности материала

$$Q_2 = (P_2^* - P_2)^2. \quad (3)$$

Общий критерий эффективности качества конечного продукта (Q_2)

$$Q_3 = (P_3^* - P_3)^2. \quad (4)$$

Принята следующая зависимость

$$\begin{aligned} P_1 &= P_1(X(t), U(t)) \\ P_2 &= P_2(X(t), U(t)), \\ P_3 &= P_3(X(t), U(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

где P_1 , P_2 и P_3 являются функционалами.

Задача принятия решений при УПП формулируется следующим образом. Для заданного начального состояния аппаратов ПП и начального состояния материала в узлах ответственности агентов и произвольного состояния материала $X(t) \in \Omega(X(t))$ найти

$$U^*(t), U^*(t) \in \Psi(U(t)), \quad (6)$$

которое обеспечивает минимум Q_1 , Q_2 и Q_3 , т.е. требуется

$$\begin{aligned} \min_{U(t) \in \Psi(U(t))} Q_1 &= (P_1^* - P_1)^2 \\ \min_{U(t) \in \Psi(U(t))} Q_2 &= (P_2^* - P_2)^2 \\ \min_{U(t) \in \Psi(U(t))} Q_3 &= (P_3^* - P_3)^2. \end{aligned}$$

Приём оптимальное $U^*(t)$, $U^*(t) \in \Psi(U(t))$ является упреждающим вектором управления.

Условия функционирования ПП:

1. На вход ПП поступает исходное сырьё, характеризующееся определёнными свойствами и определёнными объёмами (порциями). Свойства и порции исходного материала задаются нечёткими переменными.

2. Интервалы между поступлениями порций материала задаются нечёткими переменными.

3. Определена экспертная таблица, устанавливающая зависимость между свойствами материала и эффективными показателями качества аппаратов ПП (показатели качества заданы нечёткими переменными).

4. Агенты-соседи формируют согласованные решения о качестве функционирования аппаратов ПП и текущих характеристиках материала и передают принятые решения глобальному агенту. В свою очередь «агенты-не соседи» передают сведения о текущем состоянии аппаратов ПП и качестве материала.

5. Функционирование агентов состоит в принятии согласованных решений о свойствах материала.

Согласно вышесказанному, особенность поставленной задачи поддержки принятия решения состоит в следующем:

1) Для известных свойств материала экспертными методами определены эффективные значения управляемых переменных аппаратов ПП. Свойства материала являются нечёткими переменными и определяются системой нечёткой оценки. Экспертные эффективные управляемые переменные аппаратов ПП являются нечёткими переменными.

2) Коллективная задача агентов состоит в выработке согласованного общего управляющего упреждающего решения для всех аппаратов ПП с учётом движения материала и возможного изменения его свойств в активных узлах ТС.

3) Агентная система принятия упреждающего управленческого решения является надстройкой над системой управления производством. Она позволит повысить надёжность, ритмичность, стабильность, качество ПП по сравнению с ручным и локальным управлением. Агенты размещаются в узлах ответственности, в которых по косвенным признакам в реальном времени эксперты-технологи определяют качество материала и на основе этого принимают согласованные упреждающие решения.

В силу распределённости локальных систем управления и изменения во времени свойств порций материала, а также необходимости формирования комплексного управления (т.е. управляющих воздействий в момент t для всех локальных систем управления), целесообразна разработка процедуры упреждающего управления. Эта процедура в общем виде может быть описана следующим образом.

Если для i -й управляемой единицы оборудования выполняется условие

$$\bar{X}_{t_0+\tau_i} = \bar{X}_{t_0-\tau_i}, \quad (7)$$

тогда $\bar{U}_{t_0+\tau_i} = \bar{U}_{t_0-\tau_i}$.

Если условие (7) не выполняется, тогда, согласно экспертной таблице эффективности, определяется эффективное управление как $\bar{U}_{t_0+\tau_i} = \Lambda(\bar{X}_{t_0+\tau_i})$, где Λ – система правил, устанавливающая зависимость $\bar{U}_{t_0+\tau_i}$ от $\bar{X}_{t_0+\tau_i}$.

Определяем $\bar{Y}_{t_0+\tau_i} = (\bar{U}_{t_0+\tau_i}, \bar{X}_{t_0+\tau_i})$, затем $K_\Delta = (\bar{Y}_{t_0+\tau_i})$, если $\mu(K_\Delta, \bar{K}^*) \leq \delta$, где μ – процедура сравнения показателей и δ – близость показателей, тогда $\bar{U}_{t_0+\tau_i} = \bar{U}_{t_0-\tau_i}$.

Для ситуации, когда время переходного процесса исполнительного органа управления равно нулю в моменты $t_0 + \tau_i$ необходимо применить $\bar{U}_{t_0+\tau_i}$. В противном случае управление $\bar{U}_{t_0+\tau_i}$

необходимо применить в момент $t_0 + \tau_i + \omega_i - \lambda_i$, $\lambda_i \leq \tau_i + \omega_i$, где λ_i – время переходного процесса, ω_i – время переработки оборудованием материала с характеристиками $\bar{X}_{t_0 - \tau_i}$.

В случае, когда $\lambda_i > \tau_i + \omega_i$, то $\bar{U}_{t_0 + \tau_i} = \bar{U}_{t_0 - \tau_i}$, т.е. происходит потеря эффективности и возможны форс-мажорные ситуации.

Таким образом, в системе управления может быть БД, в которой накапливаются форс-мажорные ситуации. На основе анализа форс-мажорных ситуаций возможна коррекция нечёткой системы оценки свойств материала. Тем самым в процессе функционирования возможна её адаптация. Проявлением адаптивности является снижение числа форс-мажорных ситуаций и улучшение фактических показателей эффективности ПП.

На рисунке 3 представлена модель системы принятия решений при УПП как надстройка над автоматизированной системой управления технологическим процессом (далее – АСУ ТП). Модель агентного принятия решений при УПП отражает динамику функционирования ПП по принципу «вход – процесс – выход» при получении информации об изменении качества перерабатываемого материала, где:

- 1) задан интервал времени $[t_0, T]$;
- 2) определен вектор нечётких входных переменных $\bar{X}(t)$, $t \in [t_0, T]$, нечёткий вектор текущего состояния оборудования $\bar{Y}(t)$, $t \in [t_0, T]$ и нечёткий вектор управления $\bar{U}(t)$, $t \in [t_0, T]$;
- 3) определён показатель качества ПП $\bar{K}_\Delta$, $t \in [t_0, T]$;
- 4) определена параметрическая база знаний (далее – ПБЗ-1), устанавливающая связь $\bar{Y}(t) = \Omega_1(\bar{X}(t))$;
- 5) определена параметрическая база знаний (далее – ПБЗ-2), устанавливающая связь $\bar{U}(t) = \Omega_2(\bar{X}(t), \bar{Y}(t))$, где $\bar{U}(t)$ – вектор нечетких переменных, ПБЗ-1, ПБЗ-2 представлены системами продукций;
- 6) задана процедура определения фактического вектора показателя качества ПП $K_\Delta = K_\Delta(\bar{U}(t))$, $\Delta \in [0, T]$, где K_Δ – нечёткий вектор. Нечёткие векторы $\bar{K}_\Delta(t)$, $\bar{Y}(t)$, $\bar{X}(t)$, $\bar{U}(t)$ процедурой дефазификации могут быть переведены в четкие переменные.
- 7) определена процедура смешивания материала как нечёткая функция, зависящая от объема материала и его свойств $\Psi_{t_0 + \tau_i}(\bar{X}_0) = \bar{X}_{t_0 + \tau_i}$.

На рисунке 2 представлена модель системы принятия решений при управлении ПП как надстройки над АСУ ТП.



Рисунок 2 – Модель агентной системы принятия решений

Система нечеткой оценки при поддержке принятия решений для управления процессом переработки. Формирование системы нечёткой оценки включает в себя следующие стадии:

1. Формулировка проблемы (задачи), в рамках которой необходима система нечёткой оценки состояния процесса и свойств перерабатываемого материала.

2. Определение узлов, в которых происходят изменения состояния аппаратов ПП (в зависимости от свойств материала).

3. Для каждого узла определяется подсистема нечётких измерителей.

4. Для каждого измерителя определяется нечёткая переменная (на основе результатов интервью и фокус-группы с экспертами-технологами).

5. Для каждой нечёткой переменной формируется экспертная таблица нечёткой переменной (на основе результатов интервью с экспертами-технологами, являющимися фокус-группой специалистов).

6. Поиск вида и параметров функции принадлежности на основе экспертной таблицы.

7. Оценка полученной функции принадлежности.

База нечётких знаний включает следующее:

1) нечёткую систему оценки свойств материала, конечного продукта;

2) нечёткую систему оценки состояния состояний аппаратов ПП;

3) нечёткую систему оценки управляющих переменных;

4) нечёткую систему оценки показателей качества ПП;

5) функции, описывающие логику принятия решений.

1. Нечёткая система оценки свойств материала. Нечёткая система оценки представлена библиотекой модулей, предполагаемых для включения в СППР. Все модули унифицированы по входу – выходу. Входом (Y) является совокупность физических переменных для датчиков, измеряющих текущее состояние материала (массу, объём, цвет, температуру и т.д.). Выходом (X) является нечёткая переменная, значением которой является одно из свойств материала и т.д. Нечёткая переменная свойств является нечёткой функцией от датчиков, измеряющих состояния перерабатываемого сырья. На рисунке 3 представлен модуль нечёткой переменной свойств материала.

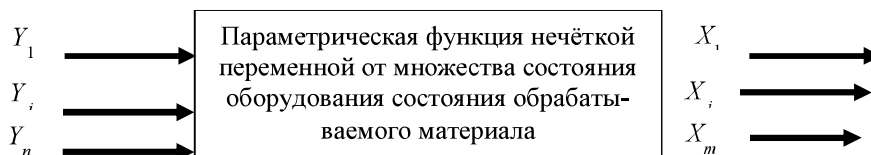


Рисунок 3 – Модуль нечёткой переменной свойств материала

2. Нечёткая система оценки состояния ПП. Текущее состояние ПП определяется на основе сведений, поступающих из системы датчиков. Переменные, характеризующие состояние ПП, являются нечёткими функциями от переменных датчиков.

3. Нечёткая система оценки показателей качества ПП. Фактические показатели качества процесса переработки определяются нечёткими переменными на момент t_i для всех узлов технологической сети. На основе этих показателей качества определяется значение критерия эффективности качества ПП.

4. Нечёткая система оценки управляющих переменных. Управляющие переменные оборудования характеризуются областями допустимых значений и являются нечёткими переменными. Экспертами для управляемого оборудования определена таблица зависимости нечётких значений управлений от нечётких свойств материала.

Эксперты-технологи определяют узлы ответственности, покрывающие всё пространство ПП. При этом узлы ответственности не пересекаются. В каждом узле ответственности определяется группа первичных датчиков, измеряющих текущее состояние аппаратов ПП и свойства материала

$$D = \{d_{ij}\}, d_{ij} - j - \text{й прибор } i - \text{й узла ответственности.}$$

Для каждого прибора определяется шкала измерений (h_{ij}), диапазон измерений (a_{ij}, b_{ij}), погрешность измерений Δ_{ij} , частота (ω_{ij}) измерения.

В каждом узле ответственности определяется группа аппаратов ПП

$$M = \{m_{ik}\}, m_{ik} - k - \text{й аппарат } i - \text{й зоны ответственности.}$$

Для i -го узла ответственности определяется матрица связи «аппарат – прибор» (R)

$$R = (r_{jk}), r_{jk} - \text{связь } j - \text{го прибора с } k - \text{м аппаратом.}$$

$$r_{jk} = \begin{cases} 0, & \text{если связь отсутствует,} \\ 1, & \text{если есть связь между } j - \text{м прибором и } k - \text{м аппаратом.} \end{cases}$$

Для каждого узла ответственности определяется группа нечётких переменных (G), характеризующих качество ПП (G_1), качество материала (G_2), конечного продукта (G_3).

Для каждого узла ответственности определяется группа регуляторов управления аппаратами ПП. Для каждого регулятора определяется управляющая переменная. Каждая управляющая переменная характеризуется диапазоном допустимых значений, шкалой измерения, погрешностью. Каждый регулятор характеризуется длительностью переходного процесса. Для каждого регулятора определена нечёткая управляющая переменная. Для каждой нечёткой переменной (x) определяется группа первичных датчиков (d), задающих универсальное множество (диапазоны значений датчиков) для значений нечёткой переменной.

Таким образом, в БЗ содержатся описания нечётких переменных, характеризующие состояния оборудования, качества материала, управляющих переменных. С БЗ связана библиотека модулей, каждый из которых реализует дефазификацию нечёткой переменной в значение переменной согласно заданному диапазону и шкале.

На рисунке 4 представлена логическая модель БД и БЗ для агентной СППР принятия решений при управлении ПП.

Данная модель включает следующие сущности, которые предназначены для хранения:

- 1) значений параметров функции принадлежности нечетких переменных;
- 2) взаимосвязей правил и нечетких переменных;
- 3) методов дефазификации нечетких переменных;
- 4) нечетких переменных;
- 5) продукционных правил преобразования входных нечетких переменных в выходные;
- 6) параметров функций принадлежности;
- 7) хранения функций принадлежности;
- 8) величин, измеряемых датчиками;
- 9) значений управляемых параметров;
- 10) связей между агентами и оборудованием в узле их ответственности;
- 11) сведений об оборудовании ПП;
- 12) связей между датчиками и измеряемыми величинами;
- 13) информации об агентах;
- 14) сообщений, которыми обмениваются агенты;
- 15) связей между агентами-соседями;
- 16) сведений о датчиках;
- 17) истории измерений датчиками;
- 18) истории изменения управляющих параметров работы оборудования.

Нечеткая модель управления режимом работы классификатора процесса обогащения.

В качестве примера применения такой базы нечетких оценок рассмотрим нечеткую модель определения режима работы классификатора (далее – КСН) на участке обогащения железорудного концентрата, реализованную в среде *Matlab, fuzzy logic toolbox*.

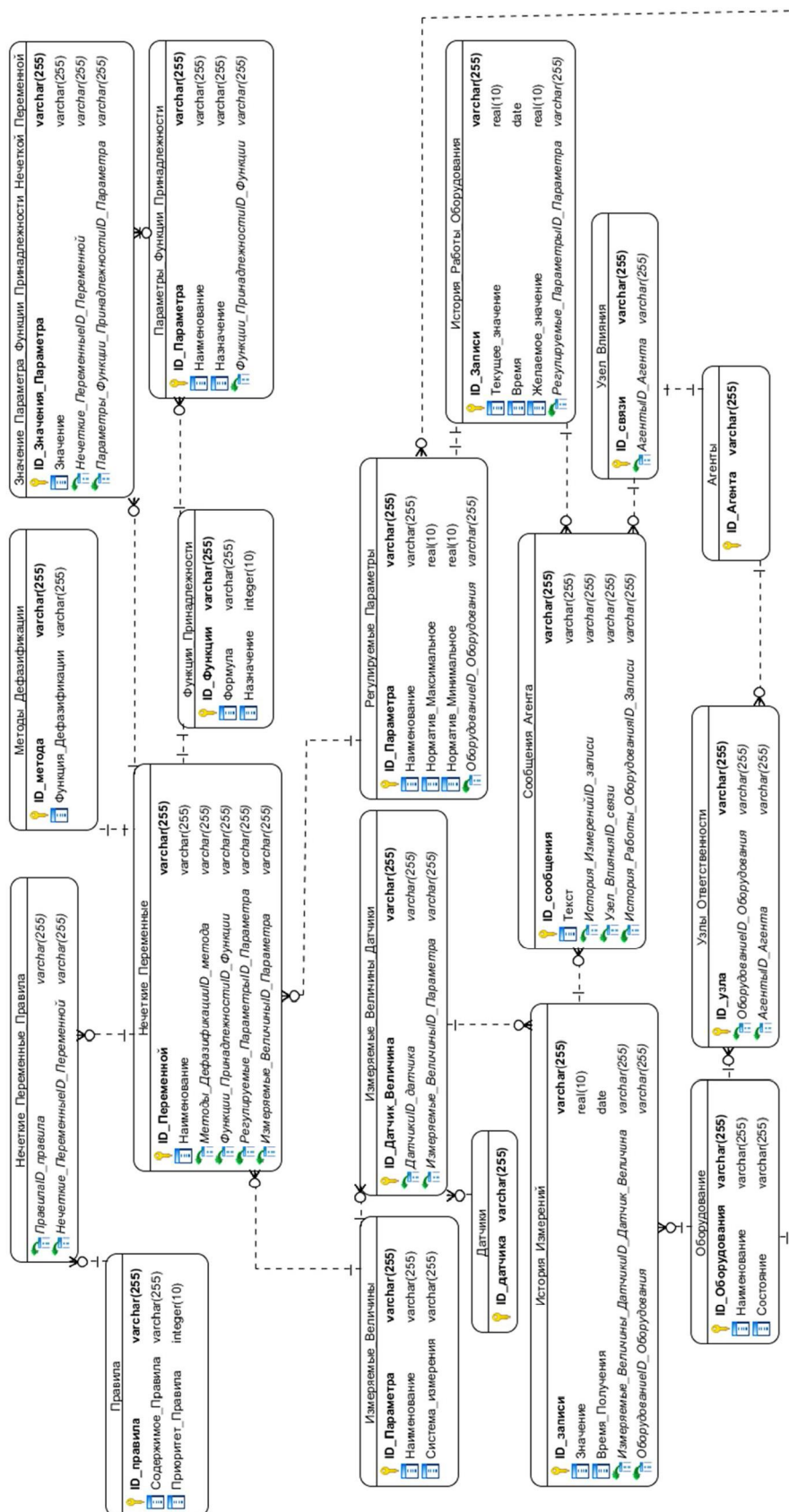


Рисунок 4 – Модель БД и БЗ агентной системы принятия решений

Классификация представляет собой процесс разделения материала на классы крупности в жидкой фазе. В таблице 1 приведены основные параметры классификатора. На рисунке 5 представлена технологическая схема классификации материала в процессе обогащения железорудного концентрата.

Таблица 1 – Основные параметры КСН

Основные параметры управления	Характеристики входного продукта	Характеристики выходного продукта
Скорость вращения винта	Плотность и гранулометрический состав слива	Производительность по пескам (плотность слива материала на следующий этап переработки – сепарацию)
Угол наклона	Интенсивность расхода – слив мельницы за единицу времени	Количество сырья, поступающего на рецикл – повторное измельчение в шаровую мельницу

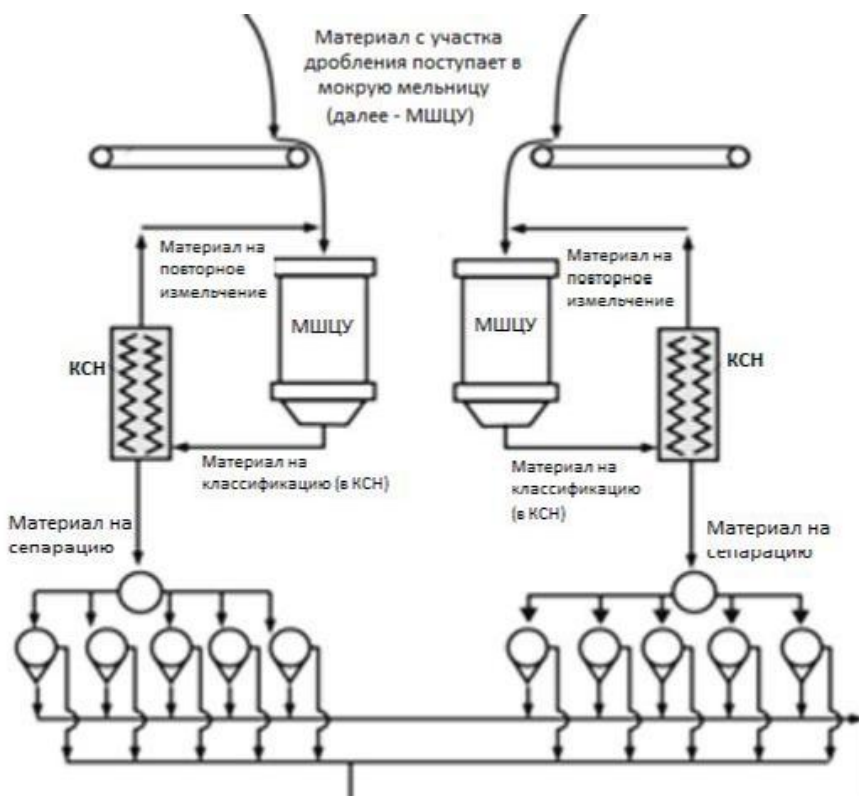


Рисунок 5 – Технологическая схема классификации материала в процессе обогащения железорудного концентрата

Нечеткая модель системы управления режимами работы КСН (рис. 6) включает в себя описание нечетких, входных и выходных параметров и систему продукций.

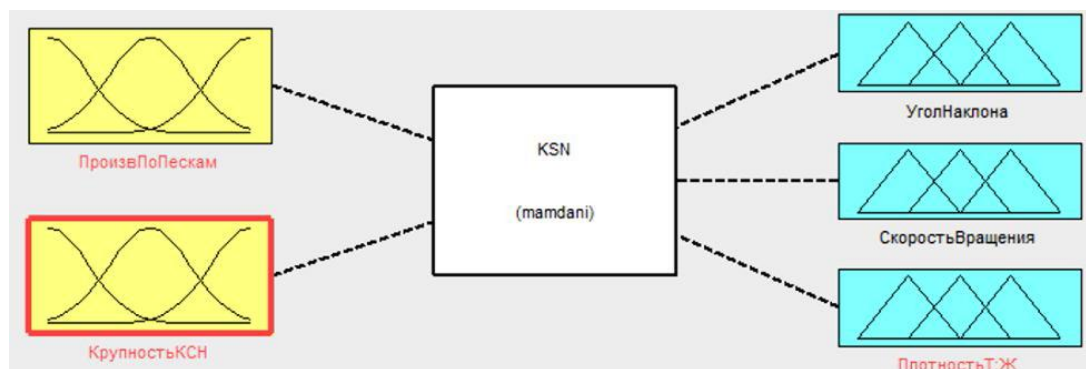


Рисунок 6 – Мнемоническое представление системы управления режимами работы КСН

Нечёткие входные переменные:

- 1) крупность материала в КСН (x_1), значения x_1 – мелкая, средняя, крупная (рис. 7а);
- 2) производительность КСН по пескам (x_2), значения x_2 – низкая, средняя, высокая (рис. 7б).

Итак, имеем две переменных, каждая из которых принимает три возможных значения, например, мелкая, средняя, крупная/высокая.

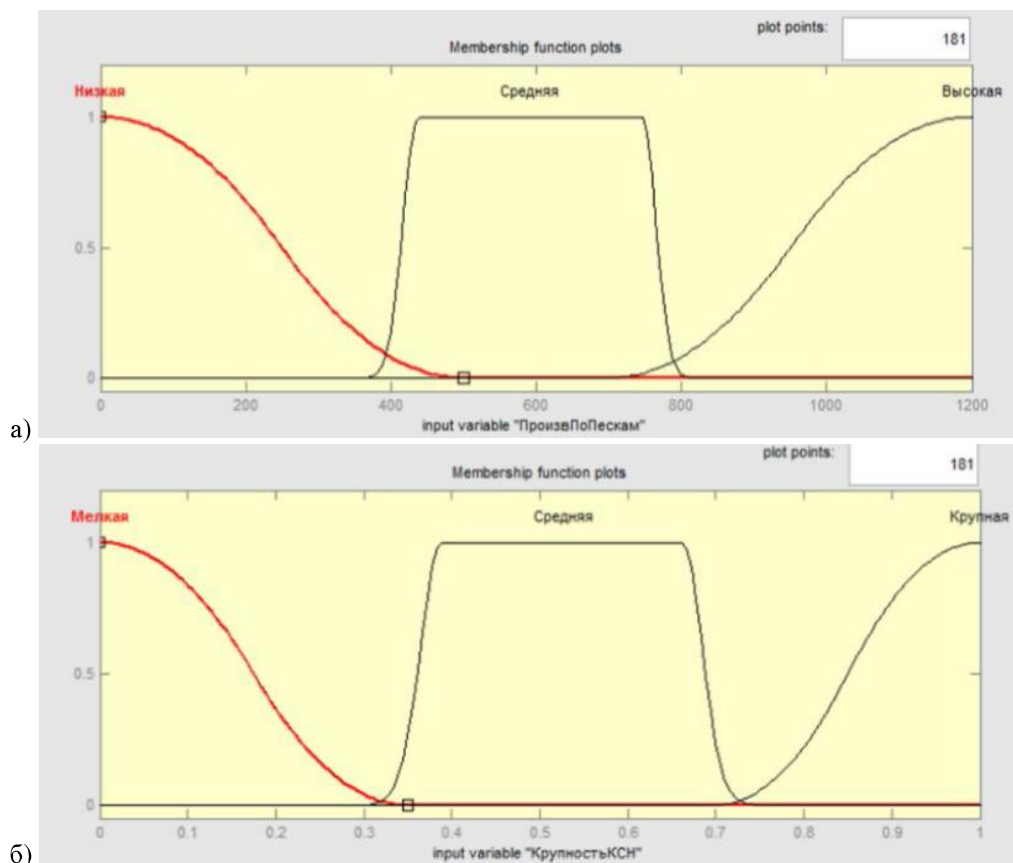


Рисунок 7 – Функции принадлежности, описывающие входные параметры: а) производительность классификатора по пескам; б) крупность материала, поступающего в классификатор

Нечёткие выходные переменные:

- 1) угол наклона классификатора – маленький, средний, большой (рис. 8а);
- 2) скорость вращения винта классификатора – низкая, средняя, высокая (рис. 8б);
- 3) плотность Т:Ж (соотношение твердого к жидкому) – низкая, средняя, высокая (рис. 8в).

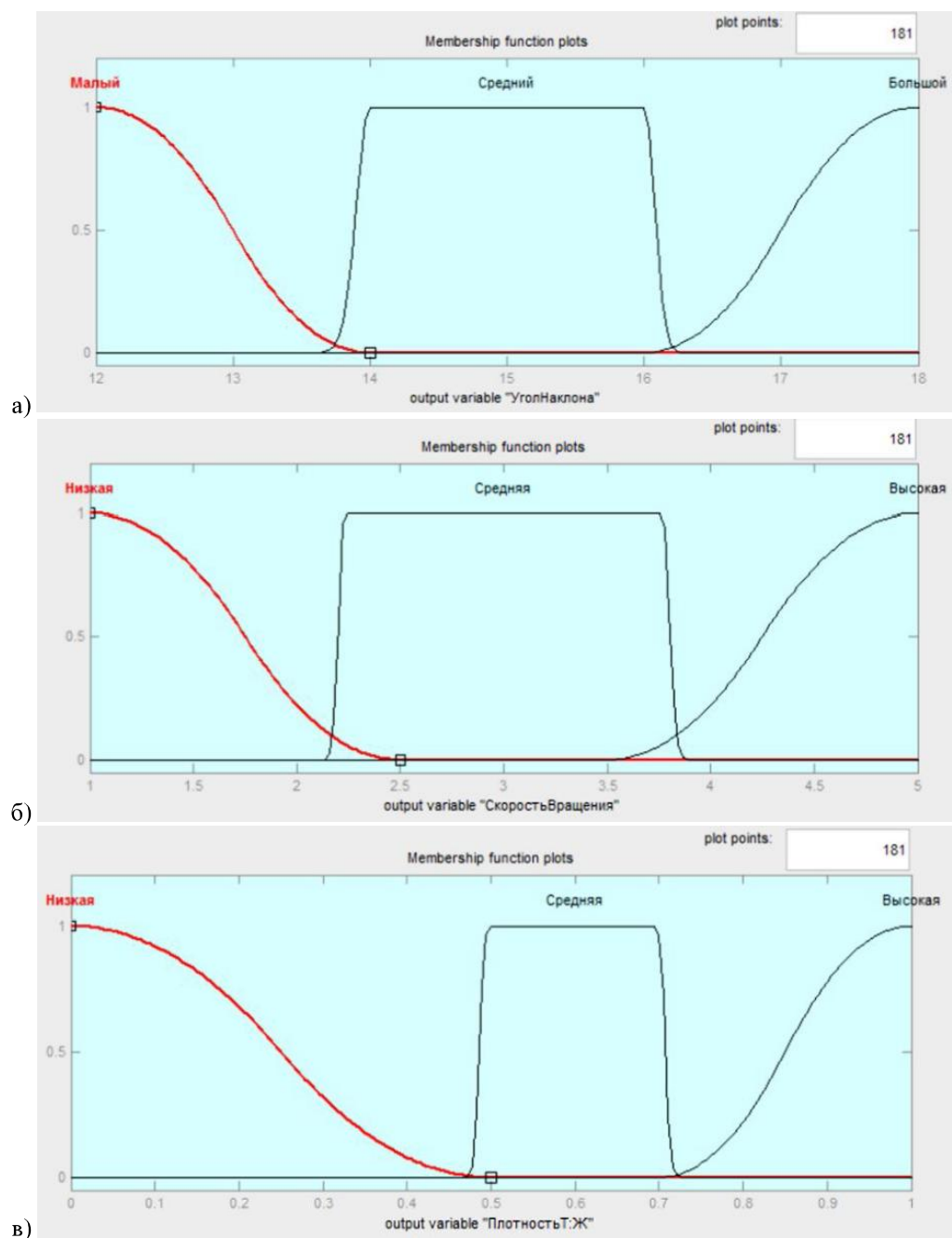


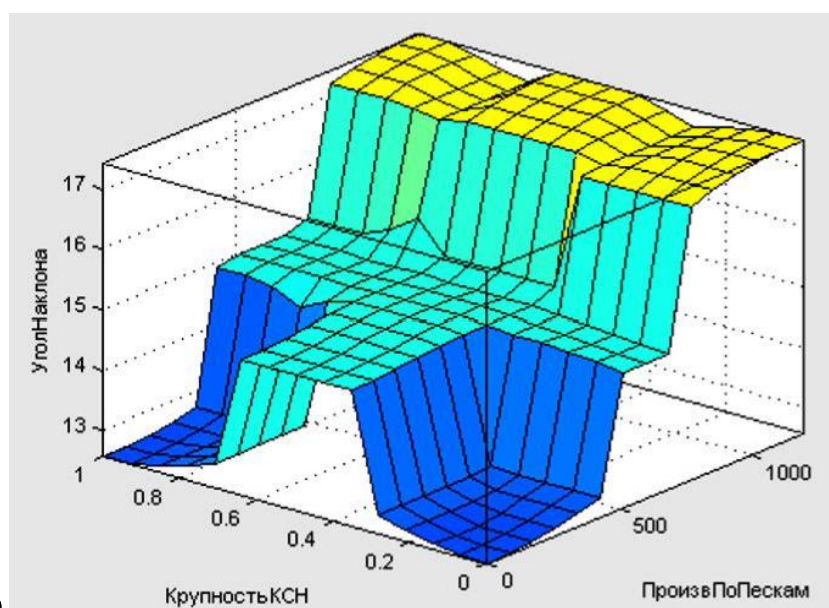
Рисунок 8 – Функции принадлежности, описывающие выходные параметры: а) угол наклона классификатора; б) скорость вращения винта классификатора; в) плотность ТЖ

Сформирована база правил (табл. 2), которые отражают зависимости между входными и выходными нечеткими переменными.

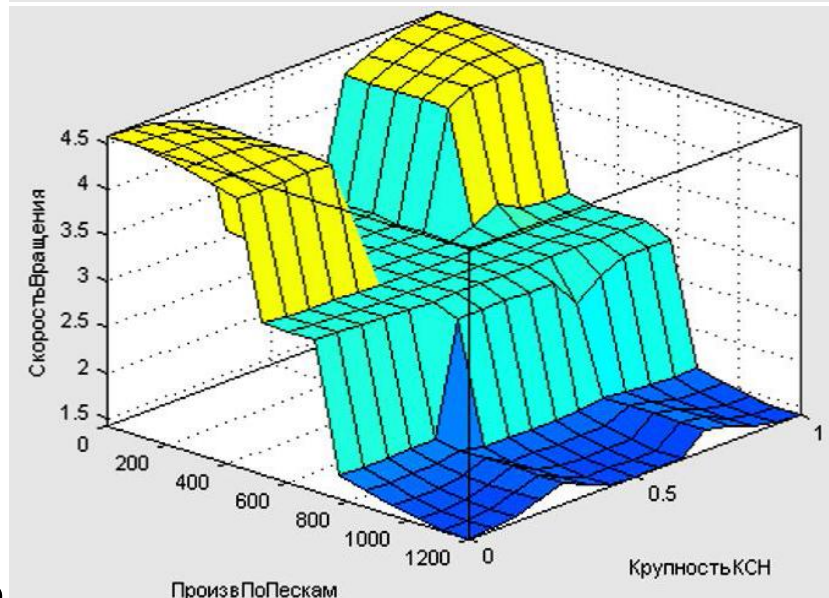
Таблица 2 – Правила дефазификации нечеткого угла наклона, скорости вращения и подачи воды в КСН (фрагмент)

1. If (ПроизвПоПескам is Низкая) and (КрупностьКСН is Мелкая) then (УголНаклона is Малый)(СкоростьВращения is Высокая)(ПлотностьТЖ is Низкая) (1)
2. If (ПроизвПоПескам is Высокая) and (КрупностьКСН is Крупная) then (УголНаклона is Большой)(СкоростьВращения is Низкая)(ПлотностьТЖ is Высокая) (1)
3. If (ПроизвПоПескам is Средняя) and (КрупностьКСН is Средняя) then (УголНаклона is Средний)(СкоростьВращения is Средняя)(ПлотностьТЖ is Средняя) (1)
4. If (ПроизвПоПескам is Высокая) and (КрупностьКСН is Средняя) then (УголНаклона is Большой)(СкоростьВращения is Низкая)(ПлотностьТЖ is Средняя) (1)
5. If (ПроизвПоПескам is Высокая) and (КрупностьКСН is Мелкая) then (УголНаклона is Большой)(СкоростьВращения is Низкая)(ПлотностьТЖ is Низкая) (1)
6. If (ПроизвПоПескам is Низкая) and (КрупностьКСН is Крупная) then (УголНаклона is Малый)(СкоростьВращения is Высокая)(ПлотностьТЖ is Высокая) (1)
7. If (ПроизвПоПескам is Средняя) and (КрупностьКСН is Крупная) then (УголНаклона is Средний)(СкоростьВращения is Средняя)(ПлотностьТЖ is Высокая) (1)

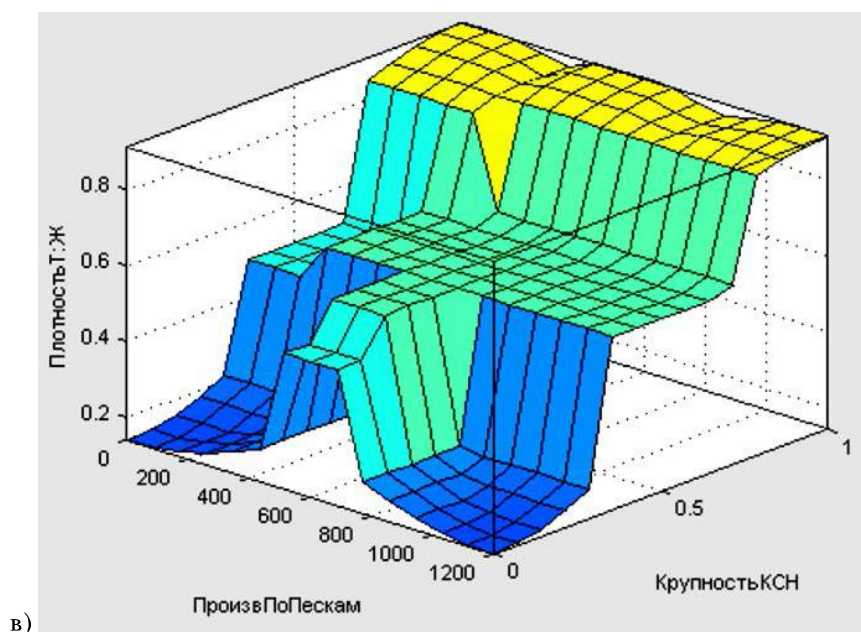
В результате формируются поверхности решений (рис. 9). Результаты дефазификации нечеткого угла наклона, скорости вращения и подачи воды в КСН представлены на рисунке 10.



а)



б)



в)

Рисунок 9 – Поверхности решений: а) по оси x – производительность КСН по пескам, по оси y – крупность материала в КСН, по оси z – угол наклона; б) по оси x – производительность КСН по пескам, по оси y – крупность материала в КСН, по оси z – скорость вращения; в) по оси x – производительность КСН по пескам, по оси y – крупность материала в КСН, по оси z – плотность Т:Ж

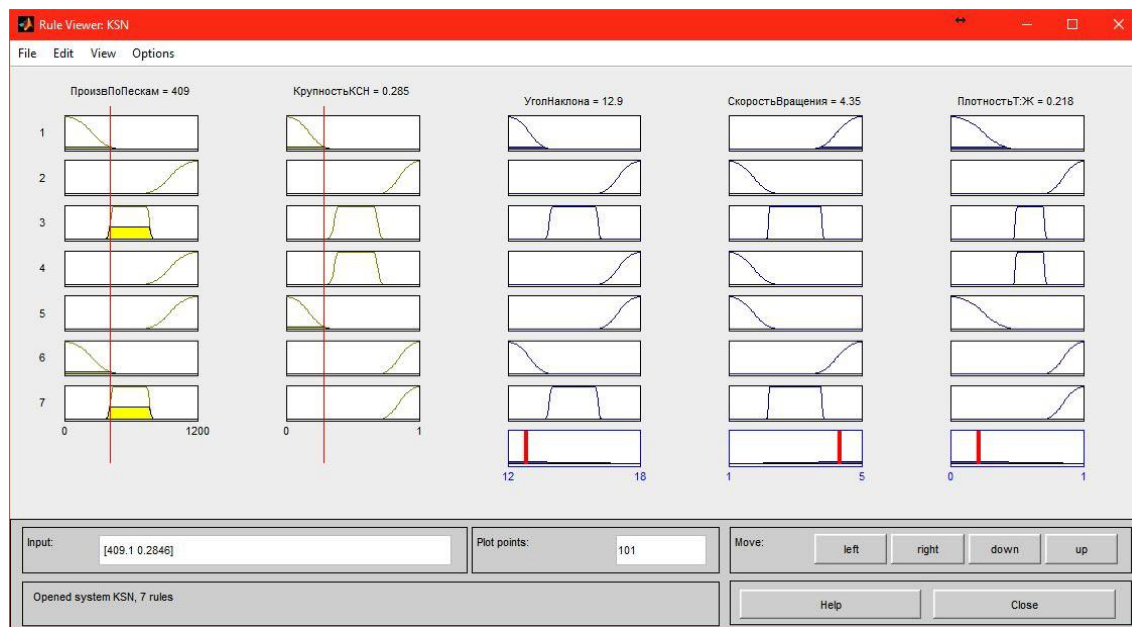


Рисунок 10 – Визуализация дефазификации нечеткого угла наклона, скорости вращения винта и подачи воды в КСН

На примере модели управления режимом работы классификатора процесса обогащения рассмотрен процесс формирования системы нечетких оценок как базовой компоненты СППР при УПП в условиях неопределенности.

Здесь необходимо отметить, что важнейшую роль в развитии СППР играет технолог. Опираясь на его знания и опыт, осуществляется адаптация и развитие системы в процессе ее функционирования (рис. 11).

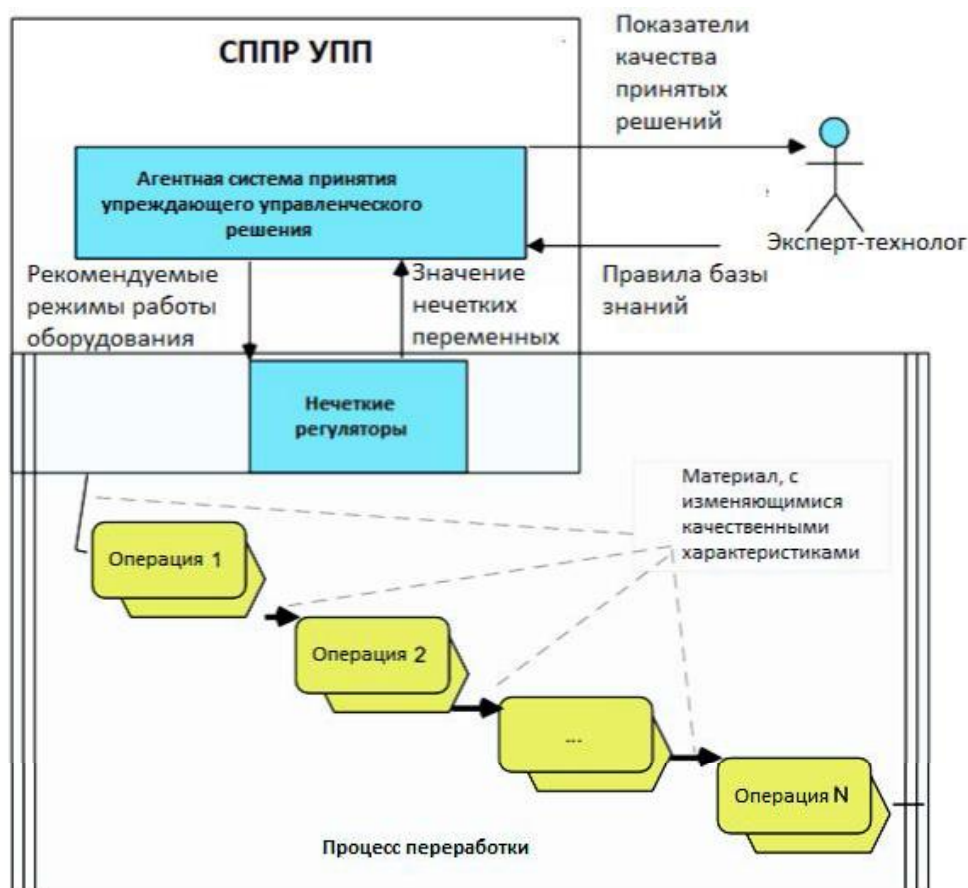


Рисунок 11 – СППР при УПП в условиях неопределенности информации о качестве материала

В рамках нечеткой системы оценки СППР при управлении процессом классификации железорудного концентрата было разработано 17 нечетких моделей (НМ) управления оборудованием:

- 1) НМ управления разгрузкой материала в бункер крупного дробления;
- 2) НМ управления производительностью крупной дробилки;
- 3) НМ управления скоростью питателя участка крупного дробления;
- 4) НМ определения результатов перемешивания руды в бункере среднего дробления;
- 5) НМ управления производительностью средней дробилки;
- 6) НМ управления скоростью питателя участка среднего дробления;
- 7) НМ определения результатов перемешивания в бункере мелкого дробления;
- 8) НМ управления производительностью мелкой дробилки;
- 9) НМ определения результатов перемешивания на конвейере передачи материала на повторное мелкое дробление;
- 10) НМ определения результатов перемешивания руды в бункере обогатительной фабрики;
- 11) НМ управления скоростью питателей на участке измельчения;
- 12) НМ управления производительностью шаровой мельницы;
- 13) НМ определения режима работы классификатора;
- 14) НМ определения режима работы магнитного сепаратора;
- 15) НМ определения результатов перемешивания материала в зумпфе;
- 16) НМ определения режима работы гидроциклона;
- 17) НМ определения режима работы дешламатора.

Сформирована первичная база знаний, включающая более 2000 правил.

Заключение. В результате проделанной работы представлена концепция СППР при управлении процессом переработки. В качестве одной из базовых компонент предложена система нечеткой оценки для поддержки принятия решения в управлении ПП в условиях неопределенности информации о качестве материала. Разработана модель базы данных и базы знаний СППР при управлении процессом переработки в условиях неопределенности. В качестве примера применения разработанного инструментария разработана модель управления режимами работы классификатора в процессе обогащения железорудного концентрата.

Библиографический список

1. Новиков С. И. Методы нечеткой логики в задачах автоматизации тепловых процессов электростанций / С. И. Новиков, В. Р. Шахнович, А. В. Сафронов // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 4. – С. 1–4.
2. Aydogan Savran. A fuzzy model based adaptive PID controller design for nonlinear and uncertain processes / Aydogan Savran, Gokalp Kahraman // ISA Transactions. – 2014. – № 53. – P. 280–288.
3. Bartolomeo Cosenza. Nonlinear fuzzy control of a fed-batch reactor for penicillin production / Bartolomeo Cosenza, Mosè Galluzzo // Computers and Chemical Engineering. – 2012. – № 36. – P. 273–281.
4. Carlo Bagnoli. The Theory of Fuzzy Logic and its Application to Real Estate Valuation / Carlo Bagnoli & Halbert C. Smith // Journal of Real Estate Research, American Real Estate Society. – 1998. – Vol. 16 (2). – P. 169–200.
5. Del Giudice V. Valuation of Real Estate Investments through Fuzzy Logic / V. Del Giudice, P. De Paola, G. B. Cantisani // Buildings. – 2017. – № 7. – P. 26.
6. Didier D. Resolution principles in possibilistic logic / D. Didier, H. Prade // International Journal of Approximate Reasoning. – 1990. – Vol. 4, issue 1. – P. 1–21.
7. Escaco J. M. Neurofuzzy model based predictive control for thermal batch processes / J. M. Escaco, C. Bordons, C. Vilas, M. R. Garcia, A. A. Alonso // Journal of Process Control. – 2009. – № 19. – P. 1566–1575.
8. Kang Jun, Wenjun Meng, Ajith Abraham, Hongbo Liu. An adaptive PID neural network for complex nonlinear system control // Neurocomputing. – 2014. – № 135. – P. 79–85.
9. McNeill M. F. Fuzzy Logic A Practical Approach / M. F. McNeill, E. Thro. – AP Professional Boston, 1994.
10. O'Hagan N. K. Decision Making with a Fuzzy Logic Inference Engine / N. K. O'Hagan, M. O'Hagan // Proc. Applications of Fuzzy Logic Technology. Sept. 1993. Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers. – 1993. – P. 320.
11. Pahola T. Benavides, Urmila Diwekar. Studying various optimal control problems in biodiesel production in a batch reactor under uncertainty / Pahola T. Benavides, Urmila Diwekar // Fuel. – 2013. – № 103. – P. 585–592.
12. William L. Oberkampf. Challenge problems: uncertainty in system response given uncertain parameters / William L. Oberkampf, Jon C. Helton, Cliff A. Joslyn, Steven F. Wojtkiewicz, Scott Ferson // Reliability Engineering and System Safety. – 2004. – № 85. – P. 11–19.
13. Yao-Qing Ren. Dynamic switching based fuzzy control strategy for a class of distributed parameter system / Yao-Qing Ren, Xiao-Gang Duan, Han-Xiong Li, C. L. Philip Chen. // Journal of Process Control. – 2014. – № 24. – P. 88–97.
14. Zadeh L. A. The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems / L. A. Zadeh // Fuzzy sets and systems. – 1983. – Vol. 11, iss. 13. – P. 197–198.

References

1. Novikov S. I., Shahnovich V. R., Safronov A. V. Metody nechetkoy logiki v zadachakh avtomatizatsii teplovykh protsessov elektrostantsiy [Fuzzy Logic Methods in the Tasks of Thermal Processes Automation of Power Plant]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University], 2010, no. 4, pp. 1–4.
2. Aydogan Savran, Gokalp Kahraman. A fuzzy model based adaptive PID controller design for nonlinear and uncertain processes. *ISA Transactions*, 2014, no. 53, pp. 280–288.
3. Bartolomeo Cosenza, Mosè Galluzzo. Nonlinear fuzzy control of a fed-batch reactor for penicillin production. *Computers and Chemical Engineering*, 2012, no. 36, pp. 273–281.
4. Carlo Bagnoli & Halbert C. Smith, The Theory of Fuzzy Logic and its Application to Real Estate Valuation. *Journal of Real Estate Research, American Real Estate Society*, 1998, vol. 16 (2), p. 169–200.
5. Del Giudice, V.; De Paola, P.; Cantisani, G.B. Valuation of Real Estate Investments through Fuzzy Logic. *Buildings*, 2017, no. 7, pp. 26.
6. Didier D., Prade H. Resolution principles in possibilistic logic. *International Journal of Approximate Reasoning*, 1990, no. 4, Issue 1, pp. 1–21.
7. Escaco J.M., Bordons C., Vilas C., Garcia M.R., Alonso A.A. Neurofuzzy model based predictive control for thermal batch processes. *Journal of Process Control*, 2009, no. 19, pp. 1566–1575.
8. Kang Jun, Wenjun Meng, Ajith Abraham, Hongbo Liu. An adaptive PID neural network for complex nonlinear system control. *Neurocomputing*, 2014, no. 135, pp. 79–85.
9. McNeill M. F., Thro E. *Fuzzy Logic A Practical Approach*. AP Professional Boston, 1994.
10. O'Hagan N. K., O'Hagan M. Decision Making with a Fuzzy Logic Inference Engine. *Proc. Applications of Fuzzy Logic Technology, Sept. 1993, Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1993, p. 320.
11. Pahola T. Benavides, Urmila Diwekar. Studying various optimal control problems in biodiesel production in a batch reactor under uncertainty. *Fuel*, 2013, no. 103, pp. 585–592.
12. William L. Oberkampf, Jon C. Helton, Cliff A. Joslyn, Steven F. Wojtkiewicz, Scott Ferson. Challenge problems: uncertainty in system response given uncertain parameters. *Reliability Engineering and System Safety*, 2004, no. 85, pp. 11–19.
13. Yao-Qing Ren, Xiao-Gang Duan, Han-Xiong Li, C. L. Philip Chen. Dynamic switching based fuzzy control strategy for a class of distributed parameter system. *Journal of Process Control*, 2014, no. 24, pp. 88–97.
14. Zadeh L. A. The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems. *Fuzzy sets and systems*, 1983, vol. 11, iss. 13, pp. 197–198.