

На правах рукописи

Милова

Миловидова Анна Александровна

**ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ
ПРОИЗВОДСТВОМ В ГОРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные технологии и промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград – 2020

Работа выполнена на кафедре системного анализа и управления в институте системного анализа и управления в государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Московской области «университет «Дубна»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Черемисина Евгения Наумовна

Официальные оппоненты:

Райков Александр Николаевич
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, лаборатория «Модульных систем обработки данных и управления», ведущий научный сотрудник;

Рыжов Александр Павлович
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», кафедра математической теории интеллектуальных систем механико-математического факультета, профессор.

Ведущая организация

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Защита состоится «12» февраля 2021 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.028.08, созданного на базе Волгоградского государственного технического университета, по адресу: 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, д. 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВолГТУ» www.vstu.ru по ссылке <http://www.vstu.ru/nauka/dissertatsionnye-sovety/obyavleniya-o-zashchitakh>.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Орлова Юлия Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В горноперерабатывающей промышленности общим фактором неопределённости в производстве является неопределённость качества материала (исходного сырья, промежуточного продукта и конечного продукта) в процессе переработки (далее – ПП). Эта неопределённость сказывается на эффективности функционирования промышленного предприятия и качестве конечного продукта. 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.

В рамках диссертации рассматривается класс процессов переработки горноперерабатывающей промышленности, характеризующийся:

- дискретно-непрерывным потоком переработки материала;
- неопределённостью информации о качестве материала;
- изменениями во времени свойств материала в различных узлах ПП;
- распределённостью в пространстве локальных систем управления аппаратами ПП;
- отсутствием (полным или частичным) в темпе протекания ПП системы оценки свойств материала;
- неопределённой зависимостью управления локальными системами от данных о свойствах перерабатываемого материала.

Мировой опыт свидетельствует, что в таких условиях наиболее эффективным путем повышения качества и снижения себестоимости выпускаемой продукции является комплексное управление ПП с использованием современных методов обработки информации при интеллектуальном, оптимальном и адаптивном управлении процессом переработки. В современной промышленности важную роль в управлении ПП играет эксперт-технолог (см. рисунок 1).

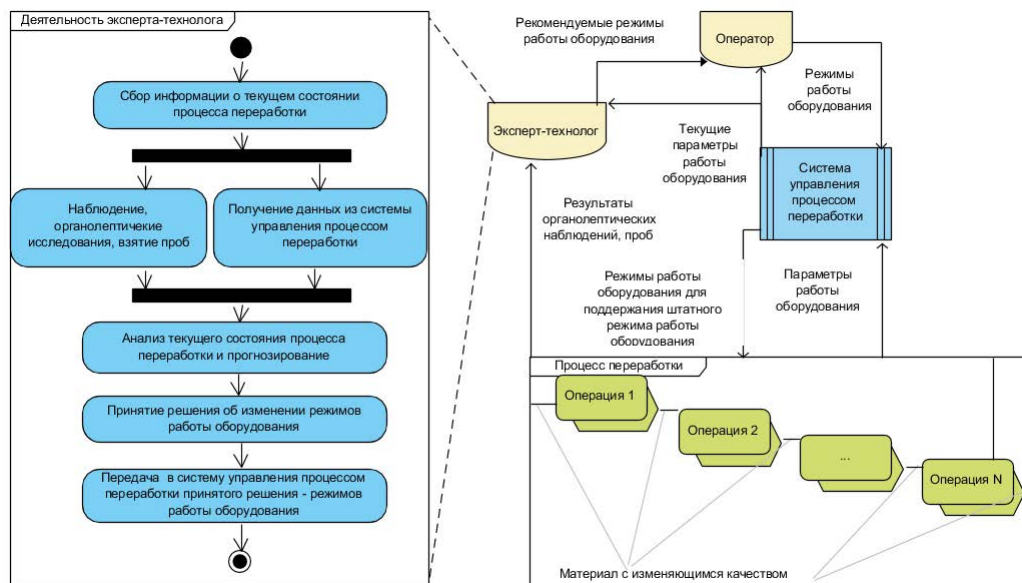


Рисунок 1 – Общая схема управления процессом переработки в условиях неопределенности информации о качестве материала

Используя свой опыт, он определяет возможное изменение качества поступающего материала или наличие форс-мажорной ситуации в производственной цепи в ходе переработки, в результате чего принимается решение об изменении режимов работы оборудования. Знания, включающие основные эмпирические принципы принятия управленческих решений технологом, являются основой для системы управления ПП. Представляет интерес применение методов

поддержки принятия решений и рассмотрение задач контроля и управления производством в перерабатывающей промышленности с учетом данных о качестве материала с общесистемных позиций при динамической корректировке параметров работы оборудования. В связи с тем, что ПП характеризуется нестационарностью, инерционностью, запаздыванием, случайными возмущениями, нечёткой информацией, научная проблема состоит в несовершенстве методов поддержки принятия решений при управлении крупным перерабатывающим предприятием.

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 управлении ПП за счёт проблемно-ориентированных систем управления и предоставление ему возможности развития и адаптации системы является одним из факторов перспективности темы. Таким образом, **актуальность темы исследования** определяется необходимостью разработки информационно-аналитического инструментария поддержки принятия решений при управлении ПП в условиях нечёткой информации о качестве материала на каждом этапе переработки.

Степень разработанности темы. Многие работы отечественных и зарубежных ученых посвящены вопросам применения нечеткой логики в управлении качеством ПП в медицине, химической, горной промышленности, агропромышленности, энергетике, электронике и других отраслях. Исследованиями в области нечеткой логики во всем мире занимаются тысячи ученых и инженеров, по этой тематике опубликованы сотни книг, десятки тысяч статей, издается более 40 научных журналов. Неоценимый вклад в развитие концепции нечеткой логики внесли Л. Задэ, А. Кофман, Д.А. Поспелов, Е.Н. Mamdani, Р. Беллман, А.В. Леоненков, L.P. Holmblad, J.J. Osregard, В. Kosko, А.Н. Аверкин, Ю.Г. Евтушенко, В.Н. Добрынин, С.В. Ульянов, Б.Н. Петров и многие другие.

В результате выполненного анализа научно-методической литературы, научных статей и монографий базой для диссертационного исследования стали результаты работ в области теории систем и систем интеллектуального управления многих исследователей, среди которых работы Б.Н. Петрова, Рыжова А.П., Абросимова В.К., Райкова А.Н., Мешалкина В.П., Мошева Е.Р., Кантюкова Р.А., Гимранова Р.К., Хорошевского В.Ф., Кузнецова О. П., Резчикова А.Ф. и др.

Объект исследования – процесс принятия управленческих решений в производственных системах, функционирующих в условиях неопределённости информации о качестве перерабатываемого материала.

Предмет исследования – методы и алгоритмы обработки данных, идентификации и поддержки принятия решений в условиях неопределённости информации о качестве перерабатываемого материала.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы системного анализа, теории управления и принятия решений, теории нечётких множеств и многоагентных систем управления; для проектирования агентной системы принятия решений – методы объектно-ориентированного и структурного проектирования; для разработки имитационной модели – дискретно-событийный и агентный подходы к имитационному моделированию.

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности процесса принятия управленческих решений в производственных системах, функционирующих в условиях неопределённости информации о качестве перерабатываемого материала за счет разработки информационно-аналитического инструментария поддержки принятия решений. Под эффективностью понимается объем производимого сырья в тоннах на заданном интервале времени.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ процессов принятия решений при управлении ПП в условиях неопределенности информации о качестве материала, исследовать существующие методы оценки качества материала экспертами-технологами.
2. Выполнить обзор и анализ современного состояния исследований в области систем

поддержки принятия решений при управлении ПП в условиях неопределённости информации о качестве перерабатываемого материала.

3. Разработать модели и методы поддержки принятия управленческих решений в условиях неопределённости информации о качестве перерабатываемого материала.
4. Выполнить проектирование и разработать программное обеспечение, реализующее предложенные методы обработки информации.
5. Осуществить настройку параметров нечёткой модели процесса переработки для установления соответствия переменных состояния модели и переменных состояния её прообраза и провести экспериментальные исследования для обоснования эффективности предложенных методов, алгоритмов и моделей.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. *Метод* настройки параметров нечёткой модели процесса переработки для установления соответствия переменных состояния модели и переменных состояния её прообраза, который обеспечивает максимальную меру близости состояния модели к состоянию процесса.
2. *Алгоритм* определения типа и параметров функции принадлежности нечёткого измерителя, позволяющий найти функцию принадлежности (тип функции и ее параметры), для которой мера различия от таблично заданной экспертами функции минимальна.
3. *Хрономодель* процесса переработки, позволяющая формировать упреждающие управляющие воздействия с учетом информации об изменении качества поступающего материала в каждом узле технологической сети процесса переработки.
4. *Модель* агентного принятия решения, позволяющая совместно агентами осуществлять выбор локальных режимов работы, при которых общий показатель эффективности процесса переработки будет максимальным.
5. Система поддержки принятия решения в условиях неопределённости информации о качестве перерабатываемого материала.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Предложена *хрономодель* процесса переработки, отличающаяся от существующих способом оценки информации о качестве потока материала в технологической сети, на основе которого формируется цифровой портрет движения потоков материала с учетом объемов и качества. Для оценки информации используется нечеткая система оценки, представляющая собой параметрическую продукционную базу знаний (п. 2, 4, 8 паспорта специальности 05.13.01).
2. Впервые разработан *метод* настройки параметров нечёткой модели процесса переработки для установления соответствия переменных состояния модели и переменных состояния её прообраза, который отличается алгоритмом определения близости состояния модели и состояния процесса, где для оценки близости используется коэффициент сходства (п. 6, 8 паспорта специальности 05.13.01).
3. Создан *алгоритм* определения типа и параметров функции принадлежности нечёткого измерителя, который отличается способом определения близости функции принадлежности таблично заданным экспертным правилам. Данный способ характеризуется тем, что при изменении экспертной таблицы, производится изменение параметров или класса функции (п. 6, 8 паспорта специальности 05.13.01).
4. Предложенная *модель* многоагентной системы *поддержки принятия решения* для управления процессом переработки отличается алгоритмом локального и глобального взаимодействия агентов (п. 9, 10 паспорта специальности 05.13.01).

Теоретическая значимость работы состоит в разработке новых и совершенствовании существующих методов и средств анализа, обработки информации и управления процессом переработки в условиях неопределённости информации о качестве перерабатываемого материала. Содержащиеся в диссертационной работе анализ, выводы и предложения могут быть использованы для разработки систем поддержки принятия решения при управлении производством в перерабатывающей промышленности.

Практическая значимость работы состоит в разработанном программном обеспечении, реализующем предложенные алгоритмы и модель. Разработаны «Программа определения

коэффициента сходства состояния модели и объекта исследования» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613902 от 26.05.2019г.), «Программа нечеткого измерения качества продукта и процесса обогащения» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613901 от 26.05.2019г.), «Программа агентного принятия эффективного решения в управлении процессом переработки железной руды» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613900 от 26.05.2019г.), «Программа моделирования процесса переработки железной руды» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614064 от 26.05.2019г.)

Результаты научных исследований были представлены на конкурсе инновационных проектов в сфере машиностроения «ТЕХНОСТАРТ» в 2015 году и получили высокую оценку – проект стал финалистом конкурса в номинации «Новые технологии для машиностроения».

Апробация результатов. Результаты проведенных экспериментов на материалах, полученных АО «Стойленский горно-обогатительный комбинат» (далее – СГОК) подтвердили экспертные оценки о возможности увеличения объемов перерабатываемого материала на 2-3%. Отмеченные факторы позволят дополнительно получить прибыль СГОК порядка 32 миллионов долларов в год. По представленным материалам АО «Стойленский горно-обогатительный комбинат» разработана хрономодель процесса обогащения материала дробильно-обогатительной фабрики. Модель и результаты экспериментов с нею стали основанием для формирования технико-коммерческого предложения на разработку ИЭСУ ППОК (Интеллектуальной экспертной системы управления процессом переработки, обучения и контроллинга). На разработанные метод и алгоритм принятия решений получен акт о внедрении от АО «Стойленский горно-обогатительный комбинат».

Результаты диссертационного исследования были внедрены ООО «Научно-технологический парк «Дубна» в рамках проектов для АС «Оборот» ОАО «РЖД» и АС «Балансовая модель по цветным, драгоценным металлам и сере» ОАО «ГМК «Норильский никель».

Основные результаты работы используются в дисциплинах «Современные проблемы системного анализа и управления», «Моделирование систем», «Моделирование информационных процессов», «Теория систем и системный анализ» государственного университета «Дубна».

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов основывается на корректном использовании методов системного анализа, теории нечетких множеств и методов моделирования; результаты вычислительных экспериментов, полученные с помощью разработанной модели, соответствуют результатам натуральных экспериментов, предоставленных специалистами СГОК.

Личный вклад соискателя заключаются в том, что все изложенные в диссертационной работе результаты исследований получены либо соискателем лично, либо при его непосредственном участии. Автором выполнен комплекс работ, включающих формулирование цели и задач исследования, обоснование методики проведения исследования, а также анализ результатов научных исследований и тенденций совершенствования теории и практики принятия решений для управления ПП в условиях неопределенности. Сформулированы защищаемые научные положения. Осуществлена реализация результатов диссертационного исследования при выполнении проектных работ и организации учебного процесса в рамках подготовки обучающихся по специальностям 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 27.04.03 «Системный анализ и управление».

Основные положения исследования докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: V Международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований», Россия, г. Москва, 29-30 августа 2014 г., Международная мультидисциплинарная конференция «Актуальные проблемы науки XXI века», г. Москва 30 января 2016 года., Международная мультидисциплинарная конференция «Актуальные проблемы науки XXI века», г. Москва 30 января 2016 года., Всероссийский семинар с международным

участием «Искусственный интеллект, когнитивное моделирование и интеллектуальная робототехника», г. Дубна, 13-17 мая 2019.

Публикации. По теме диссертации издано 16 печатных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 1 работа в зарубежных изданиях, индексируемых в базе научного цитирования Scopus. По результатам работы созданы 4 программных продукта, которые получили свидетельства о государственной регистрации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 118 наименований и 10 приложений. Общий объем работы стр. 311, из них основного текста – 152 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной автором темы исследования, поставлены цель и задачи исследования, определяются методы исследования, сформулированы достигнутые результаты, приводятся положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен системный анализ состояния исследований в области систем поддержки принятия решений при управлении ПП в условиях неопределённости информации о качестве перерабатываемого материала. Рассмотрены особенности влияния качества материала на качество ПП и конечного продукта и выявлены недостатки. Исследована роль экспертных оценок в управлении качеством ПП. Приведен обзор и основные функциональные возможности систем контроля качества продукции последнего поколения LIMS (сокр. от англ. Laboratory Information Management System, система управления лабораторной информацией). Проведен анализ существующих систем поддержки принятия решений для управления ПП в различных областях и применения при их создании нечеткой логики и многоагентных моделей.

В результате проведенного анализа сделаны следующие выводы. Колебания качества материала оказывают влияние на качество ПП и конечной продукции. На современных производствах важную роль в управлении ПП играет эксперт-технолог, который, используя косвенные признаки, органолептические методы, определяет изменение качества материала или наличие форс-мажорной ситуации и на основе своих знаний принимает решения по изменению режимов работы оборудования. Использование нечеткой логики в управлении ПП позволяет извлекать экспертные знания. Комплексное управление качеством ПП обеспечивается методологией многоагентного подхода и моделирования. Таким образом обоснована необходимость информационно-аналитического инструментария поддержки принятия решений. В заключении первой главы для достижения цели определены основные задачи исследования. Сформулированы характеристики рассматриваемого в работе класса процессов.

Во второй главе автором приводится описание разработанного информационно-аналитического инструментария поддержки принятия решений при управлении ПП в условиях неопределённости информации о качестве перерабатываемого материала.

Для формирования информационно-аналитического инструментария поддержки принятия решений были разработаны: технологическая сеть (ТС); нечеткая система оценки свойств материала, оценки качества ПП и принятия решений агентами; алгоритм определения типа и параметров функции принадлежности нечёткого измерителя для экспертной таблицы; модели БД и БЗ системы принятия решения для управления ПП; хрономодель ПП; метод настройки параметров нечёткой модели процесса переработки для установления соответствия переменных состояния модели и переменных состояния её прообраза; модель и алгоритм агентной системы принятия решений при управлении ПП.

Технологическая сеть (далее – ТС) ПП представляется ориентированным графом (возможно с петлями), узлами которого является группа аппаратов процесса. Узлы разделены на типы: активные и пассивные (см. рисунок 2).

Активные узлы характеризуются тем, что в них изменяются свойства материала, пассивные – характеризуются неизменностью свойств материала.

Активные и пассивные узлы делятся на виды: управляемые и неуправляемые. Управляемые узлы характеризуются наличием локальных систем управления оборудованием.

Неуправляемые узлы характеризуются отсутствием локальных систем управления. В таких узлах, как правило, осуществляется перенос материала переработки из одних активных узлов в другие. Задача локальной системы принятия управленческих решений состоит в поддержке на требуемом уровне работу оборудования ТС в зависимости поступающих данных о свойствах перерабатываемого материала. Каждому узлу ТС ставится в соответствие агент A_{ij} . Узел, к которому привязан агент, именуется узлом ответственности агента. Таким образом, множество узлов ТС ставится в соответствие множеству агентов – A_{ij} , где i – номер агента, j – номер узла $i = 1, 2, \dots, k, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p, \dots, m$.

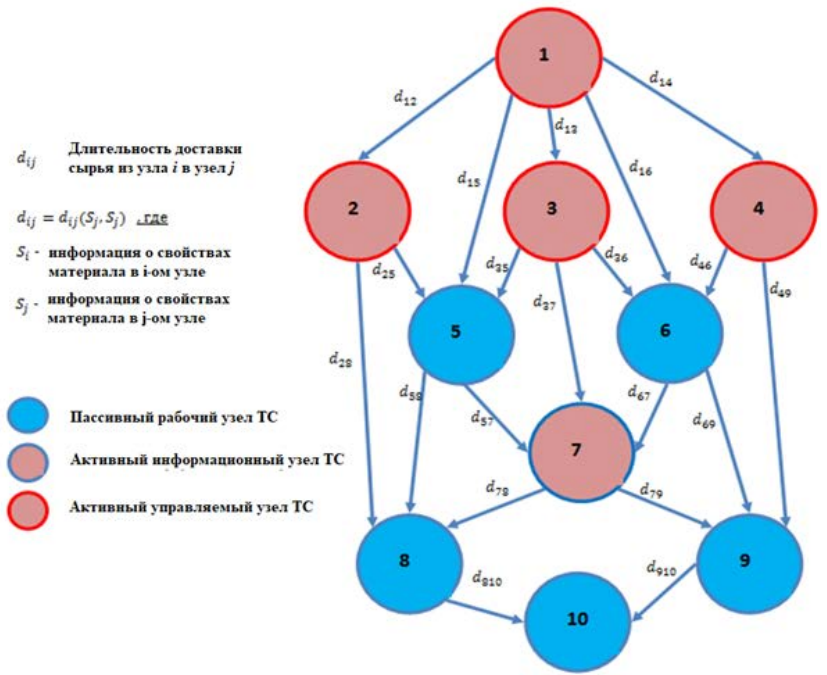


Рисунок 2 – Пример технологической сети

В узле ответственности каждый агент A_{ij} собирает в момент времени t_k следующую текущую информация по своему узлу: режим работы оборудования P ; объем V перерабатываемого материала заданного качества; время, оставшееся на переработку материала $\Delta = V \cdot P$; соответствие режима качеству материала S ; режим работы, соответствующий качеству P^* ; время, оставшееся на переработку материала при режиме соответствующем качеству Δ^* ; потери, связанные с несоответствием режима и качества материала $\Delta_{\text{потери}} = \Delta - \Delta^*, P_{\text{потери}} = P \cdot V - P^* \cdot V$. Фактически технологическая сеть за счет деятельности агентов позволяет формировать событийную модель принятия решений (см. рисунок 3).

Узел I						Узел N								
t	Свойства				Объем $V_i(t)$	Управление агента $u_i(t)$...	t	Свойства				Объем $V_n(t)$	Управление агента $u_n(t)$
	s_{i1}	s_{i2}	...	s_{ik}					s_{n1}	s_{n2}	...	s_{nk}		

Рисунок 3 – Событийная модель агентного принятия решений

Для описания деятельности агента в узле ответственности автором разработана **функциональная модель агентной системы принятия решений** (см. рисунок 4).

Каждый агент передает информацию о состоянии своего узла глобальному агенту, который, осуществляет:

1. Расчет минимального времени через, которое в одном из узлов ПП планируется изменение качества материала t .

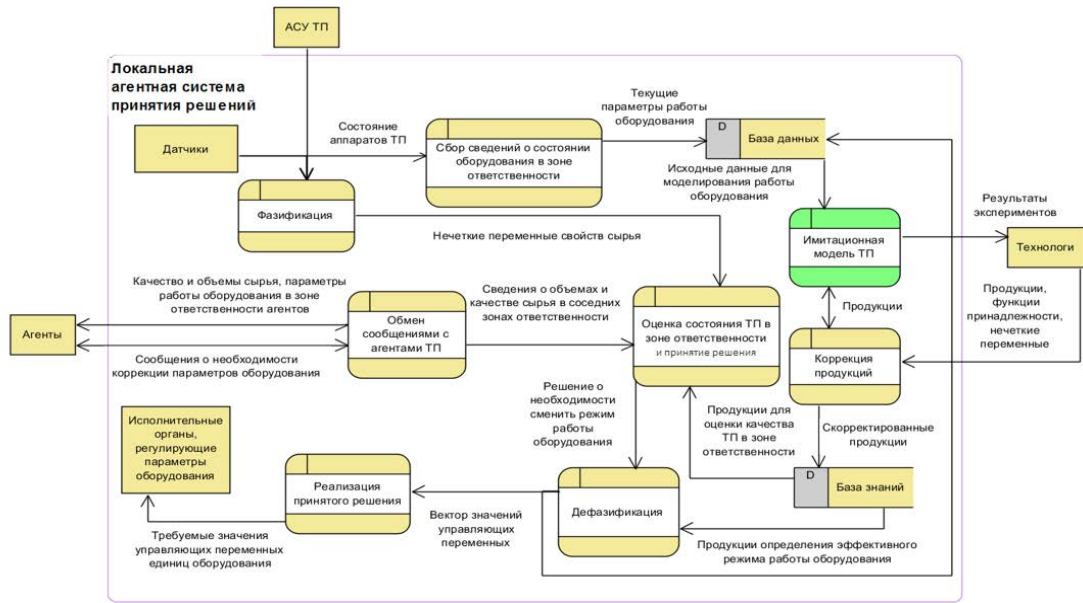


Рисунок 4 – Функциональная модель агентной системы принятия решений

2. Расчет потерь времени и производительности по всей цепи процесса переработки текущих на момент t_k .
3. Расчет потерь времени и производительности по всей цепи процесса переработки планируемых на момент t_{k+1} .
4. Выбор режима работы P для каждой единицы оборудования каждого узла агента на $t_{k+1} = t_k + \tau$
5. Передачу рекомендуемых режимов работы оборудования и время переключения в этот режим с учетом переходных процессов в узлах агентам \bar{U} .

Для формирования событийной модели, отражающей цифровой портрет движения потоков материала и их свойства, разработана **хрономодель ПП**. Хрономодель позволяет решить задачу определения порядка расположения и объем масс переработанного материала на основе информации о качестве материала в узлах ТС. Хрономодель формируется следующим образом:

1. В момент $t=t_0$ определена согласованная агентами-соседями информация о состоянии всех узлов ТС $S(t_0)$, т.е. свойства и объем (масса) материала, состояние оборудования, состояние управляющих переменных, значения критериев эффективности, длительности перемещения материала к соседним или пассивным узлам (эти длительности зависят от режимов работы управляемых аппаратов ПП и определяются для всех рабочих узлов), прогнозируемые значения переменных управления для соседних рабочих узлов. Эти значения переменных управления являются результатом согласованного решения агентов-соседей.

2. Среди длительностей перемещения масс материала к соседним рабочим узлам или к узлам не соседей (через пассивные узлы) выбирается минимальная длительность τ_{jk}^* , для $t=t_0$, т.е. $\tau_{jk}^*(t_0)$, доставки материала и т.д. к соответствующим узлам. Определяется следующий событийный момент как $t_1 = t_0 + \tau_{jk}^*(t_0)$.

3. Для момента t_1 выделяется группа узлов, для которых за минимальное время доставлены порции материала. Для этих узлов определяются фактические: объем и свойства массы материала, значения управляющих переменных; значения критериев эффективности функционирования узла. Данные значения сравниваются со значениями в момент t_{i-1} . Если сравниваемые значения удовлетворяют условию близости, что означает неизменность свойств материала, тогда управляющие переменные не изменяются. Если сравниваемые значения не удовлетворяют условию близости, что означает изменение свойств материала, агентами совместно формируется вектор управляющих воздействий. Выбор эффективного упреждающего вектора управления для всех активных узлов ТС осуществляется на основе экспертной таблицы, которая в процессе применения системы корректируется экспертами-технологами.

4. Для момента t_1 выделяется группа узлов, для которых время доставки порции материала больше τ_{jk}^* . Для этих узлов корректируется время доставки продукта в узлы агентов соседей как разница между временами доставки материала к моменту $t_1 = t_0 + \tau_{jk}^*(t_0)$. Для момента $t_i = t_{i-1} + \tau_{jk}^*(t_{i-1})$ повторяем шаги, описанные в п. 3 и 4.

Для идентификации информации о качестве материала, принятия агентами совместных решений, оценки эффективности ПП была разработана база нечётких знаний, включающая:

- нечёткую систему оценки свойств материала, конечного продукта;
- нечёткую систему оценки состояния состояний аппаратов ПП;
- нечёткую систему оценки управляющих переменных;
- нечёткую систему оценки показателей качества процесса переработки;
- нечёткие функции, описывающие логику принятия решений.

Для организации хранения данных и продукции автором спроектирована модель базы данных и базы знаний системы агентного принятия решений (см. рисунок 5). База знаний включает сущности для хранения нечетких переменных и их значений, функций принадлежности и ее параметров, методов дефазификации и правил нечеткого вывода.

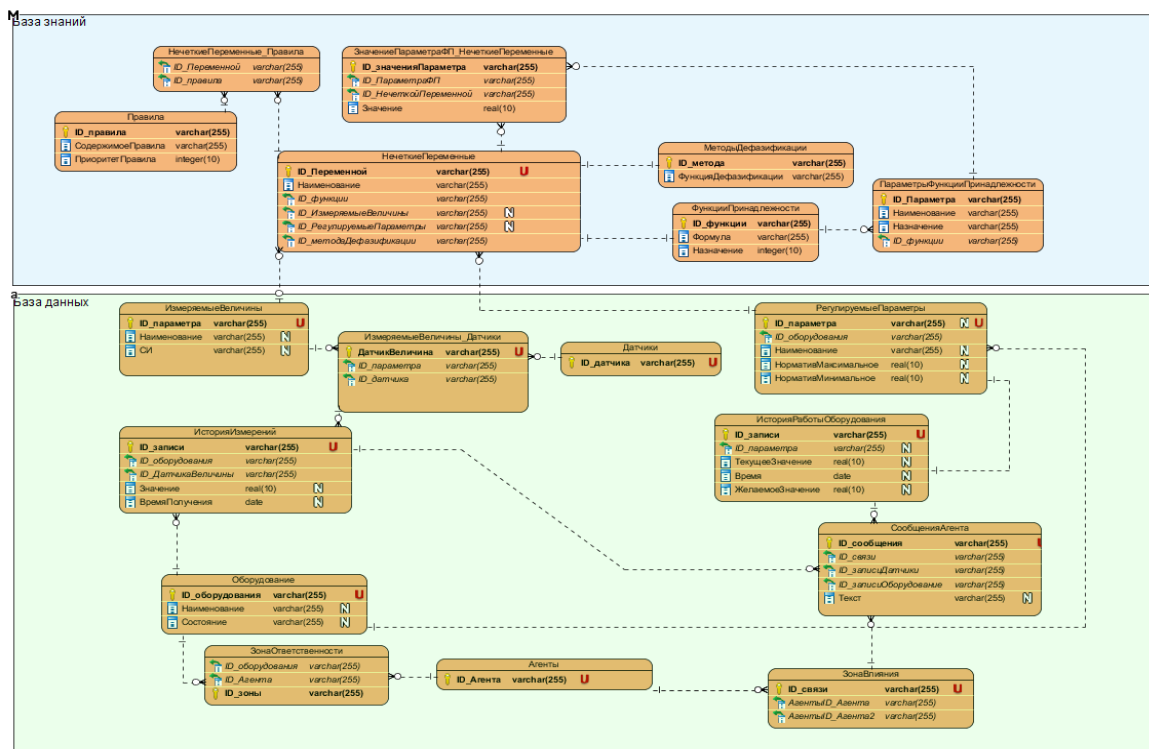


Рисунок 5 – Модель базы данных и базы знаний

Для формирования системы нечётких переменных был разработан алгоритм определения типа и параметров функции принадлежности для экспертной таблицы нечёткой переменной.

Этап 1: установить диапазон значений для поиска параметров функции принадлежности. Пусть Λ – множество нечетких переменных, $\Lambda: Y_k = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_k)$ – k -ая нечеткая переменная, y_{ki} , i -ое значение, k -ой нечеткой переменной Y_k . $Y_k: (B_k, y_{ki}, \mu_{B_k}(y_{ki}))$, где $\mu_{B_k}(y_{ki})$ – функция принадлежности $y_{ki} \in B_k$. $E_k: (\mu_{ki}, x(\mu_{ki}))$, $x \in X_k$, $i = 1, 2, \dots, N_k$ – экспертная таблица k -ого значения нечеткой переменной. $\Omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_m)$ – множество типовых значений нечетких переменных, где $\omega_i: (x_i, \gamma_m(x_i, \bar{a}_r))$, $x_i \in C_i$, $\omega_i: (0 \leq \gamma \leq 1, x_i(\gamma_m, \bar{a}_r))$, \bar{a}_r – множество векторов параметров

функций принадлежности γ_m .

Этап 2: сформировать модельные значения на основе исходных данных.

Рассмотрим k -ую нечеткую переменную X_k . Пусть для неё определена экспертная таблица $E_k : (\mu_i, x_i(\mu_i)), x \in X, i = 1, 2, \dots, N$.

Этап 3: расчет разницы между исходными и модельными данными. Рассмотрим множество $\Theta : (E_k, \Omega)$ для фиксированного k . Рассчитаем невязку $\beta_i = [x(\mu_i) - \omega_i]^2, i = 1, 2, \dots, N$ и вектор мер близости следующим образом $\Delta_i = \frac{(\max_{i=0..N} \beta_i - \beta_i)}{(\max_{i=0..N} \beta_i - \min_{i=0..N} \beta_i)}$.

Этап 4: расчет вектора близости и расчет оценки. Определим $\chi_i = \begin{cases} 1, & \Delta_i = 1 \\ 0, & \leq \Delta_i < 1 \end{cases}$ и рассчитаем коэффициент различия между E_k и Ω я для каждого ω $\varepsilon_{mr} = 1 - \frac{\sum_{i=1..N} \chi_i}{N}$ и $\min_{\substack{m=1..M \\ r=1..R}} \varepsilon_{mr} = \varepsilon^*$, а по ε^* выберем ω^* , для E_k (см. таблицу ниже).

Таблица 1 – Расчет коэффициентов различия E_k и Ω

E_k		Ω	$\omega_1(\gamma_1, \bar{a}_1, \mu_k)$				..	$\omega_p(\gamma_1, \bar{a}_r, \mu_k)$				..	$\omega_1(\gamma_m, \bar{a}_1, \mu_k)$				..	$\omega_r(\gamma_m, \bar{a}_r, \mu_k)$			
X_k	μ_k		ω_1	β	...	χ	..	ω_p	β	Δ	χ	..	ω_1	β	Δ	χ	..	ω_r	β	Δ	χ	
x_1	μ_1		ω_{11}	β_1	Δ_1	χ_1	..	ω_{11}	β_1	Δ_1	χ_1	..	ω_{11}	β_1	Δ_1	χ_1	..	ω_{11}	β_1	Δ_1	χ_1	
x_2	μ_2		ω_{12}	β_2	Δ_2	χ_2	..	ω_{12}	β_2	Δ_2	χ_2	..	ω_{12}	β_2	Δ_2	χ_2	..	ω_{12}	β_2	Δ_2	χ_2	
...	
x_N	μ_N		ω_{1N}	β_N	Δ_N	χ_N	..	ω_{1N}	β_N	Δ_N	χ_N	..	ω_{1N}	β_N	Δ_N	χ_N	..	ω_{1N}	β_N	Δ_N	χ_N	
						ε_{11}																ε_{mr}

При $0 \leq \delta \leq 1$ и $\varepsilon^* \leq \delta$ задача определения функции принадлежности для заданной экспертной таблицы решена. В противном случае возможны различные варианты поиска, в том числе: уменьшение сетки области параметров и /или шага дискретизации интервала времени; рассмотрение других функций принадлежности.

Таким образом, разработанный алгоритм определения типа и параметров функции принадлежности для экспертной таблицы нечёткой переменной позволяет формировать нечеткую базу знаний, включающую параметры и функцию принадлежности наиболее близкую из рассматриваемых типовых. Полученные функция и параметра позволяют получать выходные значения не хуже самого эксперта и уже в процессе работы системы поддержки принятия решения функция и параметры уточняются и корректируются.

Для установления соответствия переменных состояния модели и переменных состояния её прообраза модели ПП реальному процессу автором разработан **метод настройки параметров нечёткой модели процесса переработки и его прообраза**.

Пусть $\bar{Y}^*(t) = (Y_1^*\{t\}, Y_2^*\{t\}, \dots, Y_i^*\{t\}, \dots, Y_m^*\{t\})$ – состояние объекта исследования при определённых условиях R для $t \in [t_0, T]$, где $\bar{B} = (b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_m)$ – область параметров объекта. $\bar{Y}(t), t \in [0, T']$ – состояние модели объекта, при определённых условиях R' для $t \in [t_0, T]$, где $\bar{A} = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_r)$ – область параметров модели объекта.

Шаг 1. Определим систему ограничений значений параметров объекта (R) и систему ограничений значений параметров модели (R').

$$R = \begin{cases} b_1^{\min} \leq b_1 \leq b_1^{\max} \\ \dots \\ b_i^{\min} \leq b_i \leq b_i^{\max} \\ \dots \\ b_m^{\min} \leq b_m \leq b_m^{\max} \end{cases}, R' = \begin{cases} a_1^{\min} \leq a_1 \leq a_1^{\max} \\ \dots \\ a_i^{\min} \leq a_i \leq a_i^{\max} \\ \dots \\ a_r^{\min} \leq a_r \leq a_r^{\max} \end{cases}.$$

Шаг 2. Для множества R' построим сетку $S(\Delta_i): \Delta_i = \frac{a_i^{max} - a_i^{min}}{n_i}, i = 1, 2, \dots, m$. u_j – j -ый узел сетки ($j = 1, 2, \dots, n_1, n_2, \dots, n_m$). Для узла u_j определено значение \bar{A} , т.е. $(a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jm})$. Для узла u_j и начального состояния $\bar{Y}_0 \in D$ определено состояние модели $\bar{Y}(t, Y_0 \in D, (a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jm}) \in R') = \bar{Y}_j(t, \dots), j = 1, 2, \dots, n_1, n_2, \dots, n_m$. Шаг дискретизации времени $t_i = t_0 + h(i-1), h = \frac{T}{N}$, N – число точек дискретизации.

Шаг 3. В пространстве параметров модели строим матрицу квадратичных невязок W_{rm} для всех пар состояния модели и объекта.

Шаг 4. В пространстве параметров модели формируем вектор минимальных квадратичных невязок $\bar{W}_{min} = (W_{min1}, W_{min2}, \dots, W_{minr})$.

Шаг 5. В пространстве параметров модели формируем нуль единичную матрицу отклонений квадратичных невязок от минимальных W'_{rm} .

Шаг 6. В пространстве параметров модели формируем вектор коэффициентов близости ($\bar{\mu}$) и различия ($\bar{\nu}$) модели и объекта (см. таблицу ниже).

Таблица 2 – Расчет вектора коэффициентов близости модели и объекта исследования

	$Y_1^*(t), Y_1(t)$	...	$Y_m^*(t), Y_m(t)$	$\bar{\mu} (0 \leq \bar{\mu} \leq 1)$	$\bar{\nu} (0 \leq \bar{\nu} \leq 1)$
\bar{A}_1	$W'_{11} = \begin{cases} 0, \text{если } \frac{\sum(Y_1^* - Y_1)^2}{N} - W_{min1} = 0 \\ 1, \text{если } \frac{\sum(Y_1^* - Y_1)^2}{N} - W_{min1} > 0 \end{cases}$	...	$W'_{1m} = \begin{cases} 0, \text{если } \frac{\sum(Y_m^* - Y_m)^2}{N} - W_{min1} = 0 \\ 1, \text{если } \frac{\sum(Y_m^* - Y_m)^2}{N} - W_{min1} > 0 \end{cases}$	$\sum_{j=1}^m W'_{1m} / m$	$1 - \sum_{j=1}^m W'_{1m} / m$
...
\bar{A}_r	$W'_{r1} = \begin{cases} 0, \text{если } \frac{\sum(Y_1^* - Y_1)^2}{N} - W_{min1} = 0 \\ 1, \text{если } \frac{\sum(Y_1^* - Y_1)^2}{N} - W_{min1} > 0 \end{cases}$	...	$W'_{rm} = \begin{cases} 0, \text{если } \frac{\sum(Y_m^* - Y_m)^2}{N} - W_{minr} = 0 \\ 1, \text{если } \frac{\sum(Y_m^* - Y_m)^2}{N} - W_{minr} > 0 \end{cases}$	$\sum_{j=1}^m W'_{rm} / m$	$1 - \sum_{j=1}^m W'_{rm} / m$
	$W_{min1} = \min \frac{\sum(Y_1^* - Y_1)^2}{N}$		$W_{minr} = \min \frac{\sum(Y_m^* - Y_m)^2}{N}$		

Шаг 7. В векторе коэффициентов близости определяется наилучший, для этого зададим δ . Будем считать, что модель M соответствует объекту P если найдётся такое значение вектора $\bar{A} = \bar{A}' \in R'$ для которого выполняется условие $\bar{\mu} \leq \delta$, для $t \in [0, T]$.

$$\beta \geq \delta, \text{ для } t \in [0, T] \tag{1}$$

Если условие не выполняется, тогда следует уменьшить размеры сетки S или уменьшить временной шаг дискретизации. Если за определённое число шагов уменьшения размера сетки или временного шага дискретизации условие не выполняется, тогда следует, что выбранная модель не является соответствующей объекту с заданной мерой близости. Величина $\gamma = 1 - \beta$ характеризует различие модели и объекта.

На рисунке 6 представлена процессная модель агентного принятия решений (по принципу вход-процесс-выход) при получении информации об изменении качества перерабатываемого материала, где:

1. задан интервал времени $[t_0, T]$.

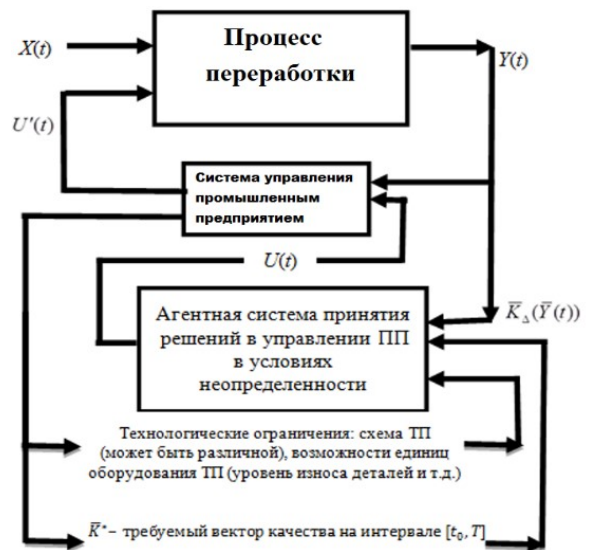


Рисунок 6 – Модель агентной системы принятия решений

2. определен вектор нечетких входных переменных $\bar{X}(t)$, $t \in [t_0, T]$, нечеткий вектор текущего состояния оборудования $\bar{Y}(t)$, $t \in [t_0, T]$ и нечеткий вектор управления $\bar{U}(t)$, $t \in [t_0, T]$;
3. определен показатель качества ПП \bar{K}_Δ , $t \in [t_0, T]$;
4. определена параметрическая база знаний (ПБЗ-1), устанавливающая связь $\bar{Y}(t) = \Omega_1(\bar{X}(t))$;
5. определена параметрическая база знаний (ПБЗ-2), устанавливающая связь $\bar{U}(t) = \Omega_2(\bar{X}(t), \bar{Y}(t))$, $\bar{U}(t)$ – 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 – нечеткий вектор. Нечеткие вектора $\bar{K}_\Delta(t)$, $\bar{Y}(t)$, $\bar{X}(t)$, $\bar{U}(t)$ процедурой дефазификации могут быть переведены в четкие переменные.
7. Определена процедура смешивания материала как нечеткая функция, зависящая от объема материала и его свойств $\Psi_{t_0+\tau_i}(\bar{X}_0) = \bar{X}_{t_0+\tau_i}$.

Предлагаемая автором **агентная система принятия решений** является надстройкой над автоматизированной системой управления промышленным предприятием и позволит увеличить объемы производства и повысить качество конечной продукции. В узлах ТС, в которых в настоящий момент по косвенным признакам эксперты определяют качество материала и на основе этого принимают решения какие управляющие воздействия осуществлять, размещаются агенты, формирующие хрономодель ПП, и на основе знаний экспертов, принимают решения по коррекции режимов работы оборудования.

В главе 3 автором разработана имитационная модель процесса управления промышленным предприятием на примере обогатительного комбината. Сформирована таблица параметров работы оборудования, отражающая зависимость режимов работы оборудования от качества материала, которая необходима для настройки параметров нечеткой модели процесса обогащения.

Разработана **технологическая сеть взаимодействия агентов в процессе обогащения** (процесса обогащения железной руды см. рис. 7). Разработанная сеть включает 92 агента, 28 узлов взаимодействия агентов (Диссертация п. 3.2 Технологическая сеть процесса обогащения). Автором разработаны 28 функциональных моделей деятельности агентов с учетом особенностей оборудования, агентов-соседей и стадий преобразования железной руды (Диссертация п. 3.3 Функциональные модели деятельности агентов). Описание деятельности агента №1 приведено на рис. 8.

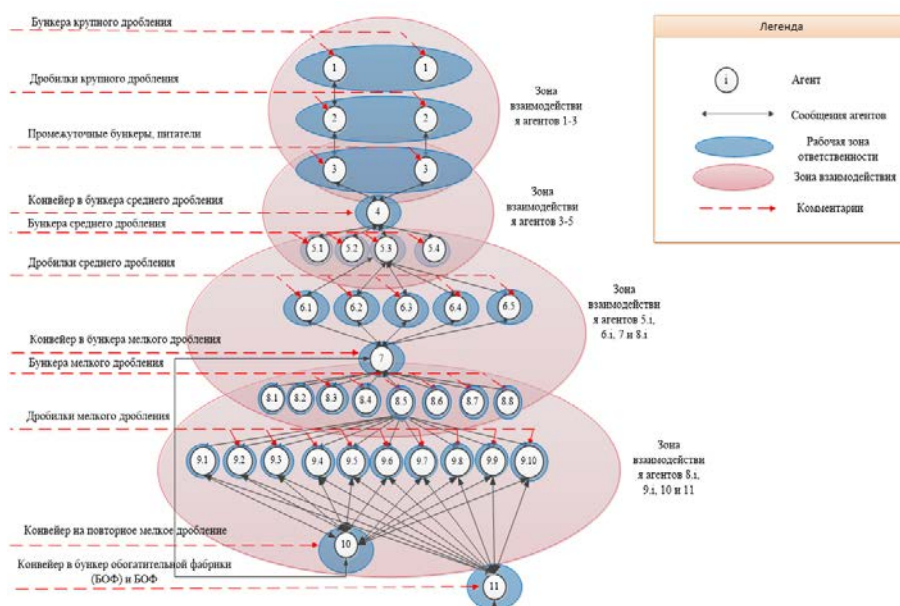


Рисунок 7 – Технологическая сеть взаимодействия агентов в процессе обогащения (фрагмент – участок дробления)

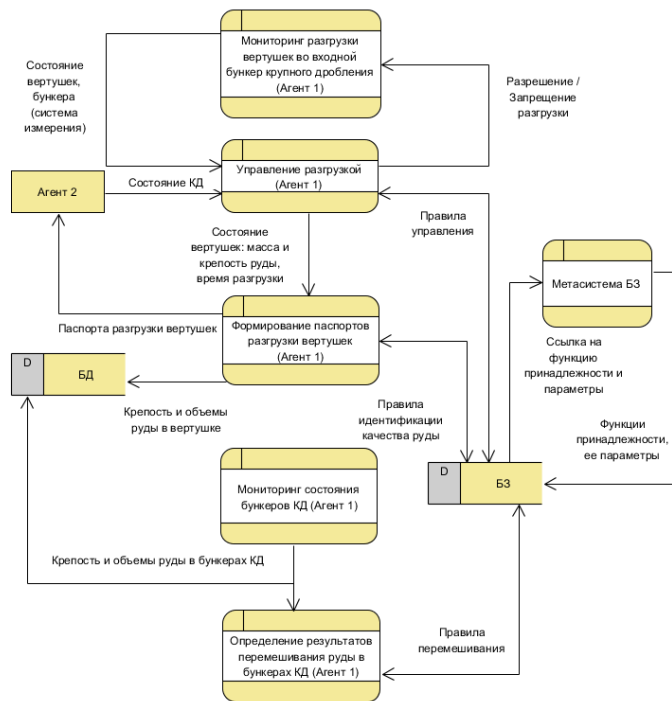


Рисунок 8 – Функциональная модель деятельности агента

Характеристики узла агента №1:

- **Процесс в узле ТС** – разгрузка вертушек в приемочные бункера (въезд вертушки в узел, позиционирование очередного думпкара у входного бункера, по команде агента «разрешить/запретить» осуществляется разгрузка всех или некоторого количества думпкаров, выезд вертушки из узла агента и т.д.). Агент может приостановить разгрузку вертушки по различным причинам.
- **Оборудование в узле агента** – приемочные бункера участка крупного дробления и вертушки, дебаркадер разгрузки вертушек в приёмный бункер руды дробилок участка крупного дробления (КД).
- **Функции агента:**
 1. Получение информации об уровне заполнения бункеров. В случае заполнения бункера до предельного уровня – агент формирует управляющее воздействие для приостановления разгрузки вертушки.
 2. Получение информации крупности кусков руды. Если крупность кусков превосходит заданную предельную величину – агент формирует управляющее воздействие для приостановления разгрузки вертушки.
 3. Получение сообщений о возникновении форс-мажорных событий – бункер не разгружается. Агент формирует управляющее воздействие для приостановления разгрузки вертушки и передает данные на уровень системы управления промышленным предприятием.
 4. Фашификация и дефашификация для определения значения нечеткой переменной крепости руды (мягкая, средняя, крепкая).
 5. Получение информации об объеме поступающей руды определенной крупности.
 6. Обмен сообщениями с агентом-соседом (агент №2).

Таким образом, агент осуществляет воздействия на процесс разгрузки руды на основе полученных данных о состоянии входного бункера и информации, полученной от Агента №2 о состоянии дробилки крупного дробления. Кроме того, Агент №1 формирует информацию о крепости руды и объеме руды в вертушке. Эти данные записываются в БД и передаются Агенту №2.

Автором разработаны 18 **нечетких моделей** определения качества железной руды в различных точках процесса обогащения и управления режимами работы оборудования.

Нечёткая функция определения режима работы единицы оборудования, устанавливающая нечёткую зависимость между производительностью и нечёткими переменными, характеризующие свойство материала. Производительность КД = Производительность КД (\bar{X}), $\bar{X} \in M$, $\bar{X} = (x_1, x_2)$, где M область определения \bar{X} (см. рис. 9-10, а, б).

$$\text{ПроизводительностьКД} = \begin{cases} \text{низкая, если } \bar{X} \in M_1 \\ \text{средняя, если } \bar{X} \in M_2, \text{ при этом } M = M_1 \oplus M_2 \oplus M_3. \\ \text{высокая, если } \bar{X} \in M_3 \end{cases}$$

Нечёткие входные переменные: крепость (x_1). Значения x_1 – мягкая, средняя, твёрдая (см. рис. 10, а); крупность (x_2). Значения x_2 – мелкая, средняя, крупная (см. рисунок 10, б); выход: производительность КД значение – низкая, средняя, высокая (см. рисунок 10, в). На основании выявленных закономерности выявлены следующие правила и сформирована БЗ, которая содержит более 1000 правил (см. рисунок 11).

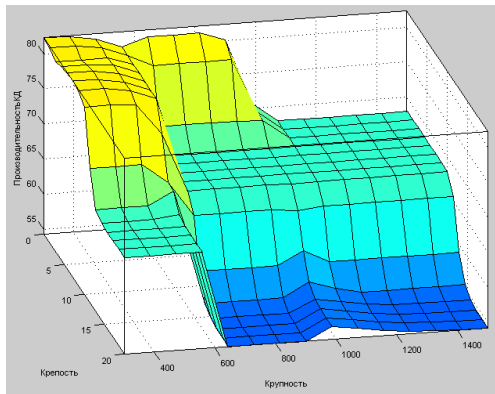


Рисунок 9 – Поверхность решений (по оси x – крепость руды, по оси y – крупность руды, по оси z – производительность КД)

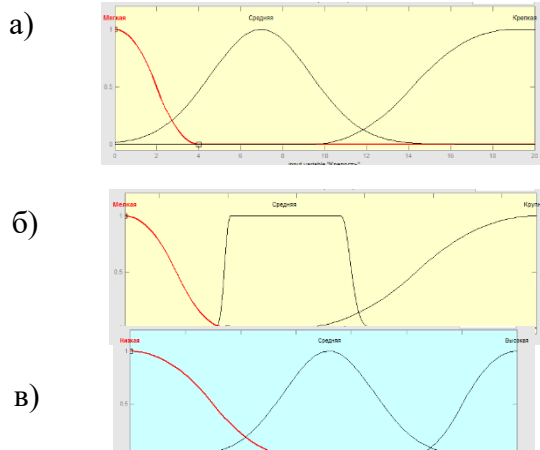


Рисунок 10 – Графики функций принадлежности, описывающие входные переменные: крепость, крупность, и выходную – производительность КД

№ агента	Состав БЗ
Агент 1 (управление разгрузкой вертушек)	1. If (УровеньБКД is Высокий) and (КрупностьБКД is Крупная) then (РазгрузкаВертушки is Запретить) (1)
	2. If (КрупностьБКД is Крупная) and (УровеньБСД is Высокий) then (РазгрузкаВертушки is Запретить) (1)
	3. If (КрупностьВертушки is Крупная) and (УровеньБКД is Высокий) then (РазгрузкаВертушки is Запретить) (1)
	4. If (КрепостьВертушки is Крепкая) and (КрупностьВертушки is Крупная) and (УровеньБКД is Высокий) then (РазгрузкаВертушки is Запретить) (1)
	5. If (КрепостьВертушки is Крепкая) and (КрупностьВертушки is Средняя) and (УровеньБКД is Высокий) then (РазгрузкаВертушки is Запретить) (1)
...	...
Агент 28 (управление режимами работы магнитного сепаратора)	6. If (СодержаниеFeМагн is Высокое) and (Плотность is Средняя) and (СодержаниеFeМагнВхвостах is Среднее) then (УровеньПульпы is Низкий)(СкоростьВращения is Низкая) (1)
	7. If (СодержаниеFeМагн is Низкое) then (УровеньПульпы is Высокий)(СкоростьВращения is Высокая) (1)
	8. If (СодержаниеFeМагн is Низкое) and (Плотность is Низкая) then (УровеньПульпы is Высокий)(СкоростьВращения is Высокая) (1)
	9. If (СодержаниеFeМагн is Низкое) and (Плотность is Низкая) and (СодержаниеFeМагнВхвостах is Низкое) then (УровеньПульпы is Высокий)(СкоростьВращения is Высокая) (1)
	10. If (СодержаниеFeМагн is Среднее) and (Плотность is Средняя) and (СодержаниеFeМагнВхвостах is Среднее) then (УровеньПульпы is Средний)(СкоростьВращения is Средняя) (1)
	11. If (СодержаниеFeМагн is Среднее) and (Плотность is Средняя) then (УровеньПульпы is Средний)(СкоростьВращения is Средняя) (1)
	12. If (СодержаниеFeМагн is Среднее) then (УровеньПульпы is Средний)(СкоростьВращения is Средняя) (1)

Рисунок 11 – База правил модели процесса обогащения (фрагмент)

Автором была разработана имитационная модель процесса обогащения железной руды для Стойленского горно-обогатительного комбината. Модель реализована в среде Anylogic с помощью библиотеки моделирования процессов, где каждая операция преобразования материала – канал обслуживания, единица оборудования – ресурс канала обслуживания, материал – это поток заявок. Разработанная имитационная модель процесса переработки отражает функциональную структуру процесса, единицы оборудования настроены по установленным нормативам технологической инструкции. Реальным объектом здесь считается модель процесса переработки, сформированная на основе данных о работе оборудования полученных из действующей системы.

Для имитации деятельности экспертов реализован класс «Технолог» и определены узлы

ответственности в соответствии со схемой и описанием работы агентов представленными выше. Всего разработанная модель содержит 23 класса различных участков процесса обогащения. База знаний, используемая в работе модели, содержащая правила поведения агентов, приведена в приложении №2 диссертации.

В главе четыре приведены результаты экспериментов с разработанной моделью и решены следующие задачи: настройка параметров нечёткой модели процесса обогащения на соответствие ее прообразу; верификация хрономодели определения свойств материала и конечного продукта в узлах агентов процесса обогащения; реализация тестирования модели агентного принятия решения.

Оценка соответствия модели осуществляется с помощью разработанного метода настройки параметров нечёткой модели процесса переработки и данных натурных экспериментов, предоставленных специалистами СГОК. Мера близости модели с реальными производственными данными составила 0,75 (см. ниже Эксперимент №1 Оборудование настроено на среднюю, магнетитовую руду).

Автором совместно с экспертами были определены узлы ТС, в которых осуществляется мониторинг информации качества материала в процессе обогащения, входные нечеткие переменные, управляемые переменные (фрагменты представлены на рисунках 12-13 полный перечень приведен в п. 3.4 База нечетких знаний Диссертации).

Величина	Единица измерения	Диапазон	Мягкие шкалы и их значения		
Крупность руды в вертушке (аналогично для дробилки и бункера крупного дробления)	мм	300-1500	Мелкая 300-700	Средняя 600-1200	Крупная 1000-1500
Крепость руды (единая для всех участков ТП)	Степень крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова	0-20	Мягкая 0-2	Средняя 2-6	Крепкая 6-20
Уровень руды в бункере крупного дробления (аналогично для промежуточного бункера)	т	0-680	Низкий 0-250	Средний 150-550	Высокий 375-680
Уровень заполнения бункера среднего дробления (аналогично для мелкого дробления)	т	0-1000	Низкий 0-350	Средний 300-800	Высокий 700-1000
Крупность руды в бункере и дробилке среднего дробления	мм	100-300	Мелкая 100-170	Средняя 150-250	Крупная 230-300
Крупность руды в бункере и дробилке мелкого дробления	мм	10-50	Мелкая 10-20	Средняя 15-45	Крупная 40-50
Измельчаемость руды	при 65% кл.-0,071 мм, кг/л.час	0,372-0,625	Низкая 0,372-0,466	Средняя 0,408-0,569	Высокая 0,55-0,625
Плотность промпродукта	Коэффициент плотности	0-1	Низкая 0-0,5	Средняя 0,475-0,725	Высокая 0,7-1
Производительность классификатора по пескам	т/мин	0-1200	Низкая 0-500	Средняя 375-800	Высокая 750-1200
Содержание Fe магн. в промпродукте	%	66-71	Низкое 66-67	Среднее 66,5-70,25	Высокое 70-71
Содержание Fe магн. в хвостах	Коэффициент плотности	0,75-1,5	Низкое 0,75-1	Среднее 0,975-1,15	Высокое 1,125-1,5

Рисунок 12 – Входные нечеткие переменные модели (фрагмент)

Величина	Единица измерения	Диапазон	Мягкие шкалы и их значения		
Разгрузка вертушки		Разрешить, Запретить	Разрешить	Запретить	
Производительность крупной дробилки	т/мин	50-85	Низкая 50-65 100-170	Средняя 50-80 150-250	Высокая 75-85 230-300
Скорость питателя крупной дробилки	м/мин	25-85	Низкая 25-55	Средняя 50-65	Высокая 65-85
Производительность средней дробилки	т/мин	16-25	Низкая 16-18 10-20	Средняя 17-23 15-45	Высокая 22-25 40-50
Скорость питателя средней дробилки	м/мин	25-85	Низкая 25-55	Средняя 50-65	Высокая 65-85
Производительность мелкой дробилки	т/мин	5-16	Низкая 5-8 0,372-0,466	Средняя 7-14 0,408-0,569	Высокая 13-16 0,55-0,625
Скорость питателя мелкой дробилки	м/мин	25-85	Низкая 25-55	Средняя 50-65	Высокая 65-85
Скорость питателя на мокрой шаровой мельнице	м/мин	25-85	Низкая 25-55	Средняя 50-65	Высокая 65-85
Производительность мокрой шаровой мельницы	т/мин	12-16	Низкая 12-13	Средняя 12,5-15,5	Высокая 15-16
Угол наклона классификатора	Градусы	12-18	Малый 12-14	Средний 13,75-16,25	Большой 16-18
Скорость вращения винта классификатора	Число оборотов об./мин	0-5	Низкая 0-2,5	Средняя 2-4	Высокая 3,5-5
Плотность Т.Ж. в классификаторе	Коэффициент плотности	0-1	Низкая 0-0,5	Средняя 0,475-0,725	Высокая 0,7-1
Уровень пульпы в ванне сепаратора	мм	12-18	Низкий 12-14	Средний 11-16,5	Высокий 16,25-18
Скорость вращения барабана сепаратора	Частота вращения барабанов, мин ⁻¹	90-150	Низкая 90-110	Средняя 100-130	Высокая 130-150
Подача пульпы насосом в гидроциклон	м ³ /ч	56-1800	Низкая 56-1000	Средняя 1000-1400	Высокая 1400-1800
Отношение диаметра насадки к диаметру слива гидроциклона	%	0-100	Малое 0-25	Среднее 20-80	Большое 75-100
% открытия слива депламатора	%	0-100	Низкое 0-22,5	Среднее 15-70,75	Высокое 75-100

Рисунок 13 – Управляемые переменные модели (фрагмент)

При проведении экспериментов модельное время ограничивалось 1440 единицами, единица модельного времени приравнивалась к минуте реального времени, что позволяет оценить возможность производства за сутки. Было установлено фиксированное начальное число, равное 1, чтобы обеспечить идентичность прогонов в разных экспериментах. В модели было задано, что с карьера поступает материал в вертушках – 4 вертушки в час. Прием осуществляется в бункер крупного дробления каждые 20 минут и в резервный – каждый час. Каждая вертушка включает 15 думкаров, а каждый думкар содержит 68 т рудного сырья. В каждой вертушке поступает

материал с заданными свойствами. Свойства для вертушек заданы в виде постоянной псевдослучайной последовательности, представленной в Приложении №5 Диссертации.

Были проведены эксперименты, в которых изменялось качество материала и режимы работы оборудования:

- Без агентного принятия решения. Оборудование настроено на среднюю, магнетитовую руду, оборудование настроено на твердую, силикатно-магнетитовую руду, оборудование настроено на мягкую, железнослюдко-магнетитовую руду, оборудование настроено на среднюю, магнетитовую руду, на ПП поступают вертушки только с твердой, силикатно-магнетитовой рудой, оборудование настроено на среднюю, магнетитовую руду, на ПП поступают вертушки со средней, магнетитовой рудой, оборудование настроено на среднюю, магнетитовую руду, на ПП поступают вертушки с мягкой, железнослюдко-магнетитовой рудой;
- С агентным принятием решений. Осуществляется коррекция параметров работы классификаторов с целью увеличения объемов отправки материала на повторное измельчение и изменение коэффициента разделения на фракции, контроль каждые 15 минут агентом изменений качества поступающего материала и изменения режимов работы оборудования, контроль каждые 15 минут агентом изменений качества поступающего материала и изменения режимов работы оборудования с запаздыванием.

В результате проведения экспериментов с моделью была сформирована сводная таблица результатов (см. таблицу 3). Максимальный объем переработанной руды (97 920 т) был получен при настройке оборудования на среднюю / магнетитовую руду, при условии, что с карьера поступает только мягкая / железнослюдко-магнетитовая руда (эксперимент №6). В связи с обеднением руд КМА (железнослюдко-магнетитовые руды составляют 14,6% от общих запасов. Соответственно подавать на производство только мягкую / железнослюдко-магнетитовую руду на ДОФ в реальности не представляется возможным. Также наибольший объем руды был переработан при настройке оборудования на твердую / силикатно-магнетитовую руду (эксперимент №2), но по результатам данного эксперимента получено максимальное количество затрат на производство (46 911 866 р.)

Реальную ситуацию отражают результаты эксперимента №1, так как в настоящее время оборудование настраивается на усредненную руду и контроль изменений не осуществляется. Поэтому возьмем результаты эксперимента №1 за основу для сравнения с результатами других экспериментов. Помимо экспериментов №2 и №6, выше среднего получены объемы переработанного материала в экспериментах №7 – 72 001 т и №8 – 73 097 т. Также в среднем (эксперимент №1) объем хвостов от общего количества переработанной руды составляет 52,5%. Результаты эксперимента № 7 показывают снижение количества полезного в хвостах на 1,5%, за счет контроля качества промпродукта, отправляемого в хвостохранилища, и рециркуляции на повторное измельчение железнослюдко-магнетитовых руд.

Таким образом, при осуществлении регулярного контроля качества материала в точках контроля, содержания железа в промпродукте, поступающем в хвостохранилище и осуществлении соответствующих корректировок параметров оборудования можно увеличить объемы перерабатываемого материала минимум на 2-3%.

Таблица 3 – Сводная таблица результатов экспериментов

Показатели	Эксперименты								
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9
	Оборудование настроено на среднюю, магнетитовую руду	Оборудование настроено на твердую, силикатно-магнетитовую руду	Оборудование настроено на мягкую, железослюдко-магнетитовую руду	Оборудование настроено на среднюю, магнетитовую руду поступают вертушки только с твердой, силикатно-магнетитовой рудой	Оборудование настроено на среднюю, магнетитовую руду, поступают вертушки со средней, магнетитовой рудой	Оборудование настроено на среднюю, магнетитовую руду, поступают вертушки с мягкой, железослюдко-магнетитовой рудой	Коррекция параметров работы классификаторов с целью увеличения объемов отправки промпродукта на повторное измельчение	15 минутный контроль и управления параметрами оборудования агентами	Контроль изменения качества руды и управление производительностями оборудования с запаздыванием
Затраты на крупное дробление	273 306р.	376 254р.	245 383р.	338 628р.	250 291р.	245 384р.	273 645р.	270 314р.	281 246р.
Затраты на среднее и мелкое дробление	3 251 814р.	4 476 698р.	2 919 585р.	4 029 028р.	2 977 977р.	2 919 585р.	3 255 850р.	3 216 215р.	3 346 290р.
Затраты дробильного отделения	3 525 120р.	4 852 952р.	3 164 968р.	4 367 656р.	3 228 268р.	3 101 669р.	3 529 495р.	3 486 529р.	3 627 536р.
Измельчение	31 178 887р.	39 442 992р.	25 723 690р.	39 442 992р.	31 725 885р.	25 723 690р.	35 392 741р.	34 961 894р.	36 375 870р.
Фильтрация	2 067 833р.	2 615 922р.	1 706 036р.	2 615 922р.	2 104 111р.	1 706 036р.	2 347 302р.	2 318 728р.	2 412 505р.
Обогащение	33 246 720р.	42 058 914р.	27 429 726р.	42 058 914р.	33 829 996р.	27 429 726р.	37 740 043р.	37 280 622р.	38 788 375р.
Всего	36 771 840р.	46 911 866р.	30 594 694р.	46 426 570р.	37 058 264р.	30 531 395р.	41 269 538р.	40 767 151р.	42 415 911р.
Концентрат	33374т	41076т	30807т	25673т	32799т	46465т	35640,495т	34686т	31706т
Хвосты	36958т	45487т	34115т	28429т	36321т	51455т	36360,505т	38411т	35110т
Руда	70332т	86563т	64922т	54102т	69120т	97920т	72001т	73097т	66816т

Примечание:

Зеленым выделены максимальные объемы переработки руды и минимальные затраты.

Красным выделены минимальные объемы переработки руды и максимальные затраты.

Основные результаты работы

1. Выполнен анализ процессов принятия решений при управлении ПП в условиях неопределенности информации о качестве материала, исследовать существующие методы оценки качества материала экспертами-технологами. Выполнен обзор и анализ современного состояния исследований в области систем поддержки принятия решений при управлении ПП в условиях неопределенности информации о качестве перерабатываемого материала.
2. Разработан метод настройки параметров нечёткой модели процесса переработки для установления соответствия переменных состояния модели и переменных состояния её прообраза, позволяющий найти вектор параметров модели, обеспечивающий максимальную меру близости по состоянию модели к процессу.
3. Разработан алгоритм определения типа и параметров функции принадлежности нечёткого измерителя, позволяющий найти функцию принадлежности (тип функции и ее параметры), для которой мера различия от таблично заданной экспертами функции минимальна.
4. Разработана хрономодель процесса переработки, позволяющая формировать упреждающие управляющие воздействия с учетом информации об изменении качества поступающего материала в каждом узле технологической сети процесса переработки.
5. Разработана модель агентного принятия решения, позволяющая совместно агентами осуществлять выбор локальных режимов работы, при которых общий показатель эффективности процесса переработки будет максимальным. В результате проведенных испытаний на модели обогащения железорудного концентрата за счет применения разработанного инструментария поддержки принятия решения промышленное предприятие может получить прибыль порядка 32 миллиона долларов в год.
6. Получены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ № 2019613902 от 26.05.2019г., № 2019613900 от 26.05.2019г., № 2019614064 от 26.05.2019г.

Дальнейшие научные исследования в данном направлении связаны с разработкой уровня управления моделей и алгоритмов управления оборудованием ПП с помощью нечетких PID-регуляторов; разработкой рабочего места эксперта-технолога, которое позволит формировать прогнозные планы процесса переработки с учетом уровня автоматизации промышленного предприятия и специфики ПП, а также создание тренажёра для подготовки специалистов в области проектирования и управления ПП на базе разработанного инструментария.

Публикации

Статьи в периодических изданиях, включенных в список ВАК РФ

1. Миловидова А.А. Хрономодель процесса переработки в условиях нечеткой и неполной информации о качестве сырья [Текст] // А.А. Миловидова / Перспективы науки. – 2019. №6 (117). – С. 25-28.
2. Миловидова А.А., Черемисина Е.Н., Добрынин В.Н., Соколов И.А. Многоагентное управление процессом переработки сырья в условиях информационной неопределенности / Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2019. №8. – С. 91-95.
3. Миловидова А.А., Черемисина Е.Н., Добрынин В.Н. Алгоритм определения типа и параметров функции принадлежности нечёткого измерителя / Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2019. – №9. – С. 69-74.
4. Миловидова А.А. Формирование нечеткой системы оценки для системы поддержки принятия решений при управлении процессом переработки в условиях неопределенности информации о качестве материала // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – №1. – Стр. 33-48.

Публикации, проиндексированные в Scopus:

5. Добрынин В.Н., Эндерев В.А., Миловидова А.А. Система интеллектуального управления технологией обогащения (на примере Стойленского ГОКа) // Crushing process intelligent control system (through the example of the stoilensky mining and beneficiation complex //

Обогащение руд, №6, 2014, ISSN 0202-3776.

Статьи в межвузовских научных сборниках, сборниках трудов международных, всероссийских конференций

6. Добрынин В.Н., Эндерев В.А., Миловидова А.А. Многоагентное имитационно-событийное моделирование управления качеством дискретно-непрерывных технологических процессов: проблемы, концепция, задачи, методы // Электронный научный журнал «Системный анализ в науке и образовании», 2014, № 1. ISSN: 2071-9612.
7. Добрынин В.Н., Миловидова А.А. Многоагентное имитационно-событийное моделирование управления качеством дискретно-непрерывных технологических процессов: проблемы, концепция, задачи, методы // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна» Серия «Системный анализ в современном обществе» № 1 (29), 2014, ISSN: 1818-0744.
8. Добрынин В.Н., Эндерев В.А., Миловидова А.А. Методология моделирования управления качеством дискретно-непрерывных технологических процессов на основе событийно-имитационного мультиагентного подхода // V Международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований», Россия, г. Москва, 29-30 августа 2014 г.
9. Добрынин В.Н., Миловидова А.А. VI Интеллектуальное управление качеством технологических процессов в промышленности // Международная мультидисциплинарная конференция «Актуальные проблемы науки XXI века», г. Москва 30 января 2016 года.
10. Добрынин В.Н., Эндерев В.А., Попов А.М., Миловидова А.А. АСУ ТП обогащения руд: иллюзии, проблемы, перспективы // Электронный научный журнал «Системный анализ в науке и образовании», 2016, № 1. ISSN: 2071-9612.
11. Добрынин В.Н., Миловидова А.А., Соколов И.А. Оценка адекватности модели и объекта исследования // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, РУДН, 16–20 апреля 2018 г. – Москва: РУДН, 2018, С. 252-255.
12. Добрынин В.Н., Миловидова А.А. Интеллектуальное управление социотехническими системами в условиях информационной неопределенности // Всероссийский семинар с международным участием «Искусственный интеллект, когнитивное моделирование и интеллектуальная робототехника», г. Дубна, 13-17 мая 2019.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613902 от 26.05.2019г. «Программа определения коэффициента сходства состояния модели и объекта исследования» / А.А. Миловидова, Е.Н. Черемисина, В.Н. Добрынин, И.А. Соколов. Государственный университет «Дубна». – 2019.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613901 от 26.05.2019г. «Программа нечеткого измерения качества продукта и процесса обогащения» / А.А. Миловидова, Е.Н. Черемисина, В.Н. Добрынин. Государственный университет «Дубна». – 2019.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613900 от 26.05.2019г. «Программа агентного принятия эффективного решения в управлении процессом переработки железной руды» / А.А. Миловидова, Е.Н. Черемисина, В.Н. Добрынин. Государственный университет «Дубна». – 2019.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614064 от 26.05.2019г. «Программа моделирования процесса переработки железной руды» / А.А. Миловидова, Е.Н. Черемисина, В.Н. Добрынин. Государственный университет «Дубна». – 2019.